공학박사 학위논문

유전적 알고리듬을 이용한 3차원 PTV기법의 구축과 원주 근접후류 유동특성에 관한 연구

3D-PTV Construction Based on Genetic Algorithm and Its Application to the Wake Characteristics Near Circular Cylinder

지 도 교 수　　도 덕 희

2001년　2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

백　　태　　실

本 論文을 白泰實의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 南 靑 都 印

委 員 工學博士 孫 景 浩 印

委 員 工學博士 金 義 玕 印

委 員 工學博士 李 英 浩 印

委 員 工學博士 都 德 熙 印

2000年 12月 15日

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Figures

List of Table

3D-PTV Construction Based on Genetic Algorithm and Its Application to the Wake Characteristics Near Circular Cylinder

by

Baek Tae-Sil

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

A GA(Genetic Algorithm) based 3D-PTV technique has been developed for the measurement of the wake of a circular cylinder. The measurement system consists of three CCD cameras, Ar-ion laser, an image grabber and a host computer. The fundamental of the developed technique was based on that one-to-one correspondence is found between two tracer particles selected at two different image frames taking advantage of combinatorial optimization of the genetic algorithm. The fitness function controlling reproductive success in the genetic algorithm was expressed by a kind of continuum theory on the sparsely distributed particles in space.

In order to verify the capability of the constructed measurement system, a performance test was made using a set of virtual images on a impinging jet. After confirming the performances of the constructed system, the system was applied to the measurement of flow characteristics of the wake of a circular cylinder.

The belows are the summary of the thesis.

GA based 3D-PTV system for the measurement of complex flow structure are constructed in the first half of the thesis.

The performances test on the constructed system is made using the sets of virtual images generated by a LES data set on a impinging jet flow. Through this test it is verified that the vector recovery ratio becomes higher three times than those of other studies. It is shown that about 1,100 three-dimensional instantaneous velocity vectors is obtained in an actual experiment, which implies that the recovery ratio is more than over about 65%. This percentage is most highest among other three-dimensional PTV techniques.

The constructed system having the above performances is applied to the measurement of the flow field near the wake of a circular cylinder and turbulent characteristics of the flow such as turbulent intensity, Reynolds stresses, turbulent kinetic energy are measured by the constructed system. Good qualitative and quantitative results on the turbulent properties are shown.

Lastly, it is shown that the constructed 3D-GA-PTV system will be able to be used for the investigation of the turbulent characteristics of complex flows since the number of 3D velocity vectors obtained by the system is big enough than the limits, 700, for probing the turbulences of complex flows.

기호설명

$3DE$	fitness for Genetic Algorithm
a_{ij}	rotation matrix
c	plane distance from lens center
C	fitness for Genetic Algorithm
D	diameter of cylinder
Di	divergence of velocity
DM	threshold of Di
d_p	radius of particle
k_1, k_2	lens coefficient
I	intensity of particle
I_0	maximum intensity of particle
RES	Reynolds shear stress
R_{uv}	Reynolds shear stress ($R_{uv} = -\overline{u'v'} / U_0^2$)
R_{uw}	Reynolds shear stress ($R_{uw} = -\overline{u'w'} / U_0^2$)
R_{vw}	Reynolds shear stress ($R_{vw} = -\overline{v'w'} / U_0^2$)
t_1, t_2, t_3	variables used for calculation of 3-D particle position
T_u	streamwise turbulence intensity ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)
T_v	transverse turbulence intensity ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)
T_w	spanwise turbulence intensity ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)
U_0	free stream velocity
TKE	turbulence kinetic energy ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)
u'	streamwise fluctuating component
v'	transverse fluctuating component
w'	spanwise fluctuating component
x_0, y_0	deviation of the principal point from the center of image

x_i, y_i	photographic coordinate system
x, y	coordinates on photograph
$\bar{x}$, $\bar{y}$	center point of Area moment
$\tilde{x}$, $\tilde{y}$	distance from the principal point
X_p, Y_p	projected particle to image plane
X, Y, Z	absolute coordinate system
X_0, Y_0, Z_0	center of projection
Δt	time interval between obtained field image
u, v, w	velocity of x, y, z direction
$\Delta x, \Delta y$	lens distortion

Greek characters

ω	tilted angle for X axis
ϕ	tilted angle for Y axis
$\varkappa$	tilted angle for Z axis
σ_l	radius of cylindrical light
σ_x, σ_y, σ_z	standard deviation of X, Y, Z
ϕ_e	error ratio
ϕ_r	recovery ratio

제 1장 서 론

1.1 연구의 배경 및 관련 연구

유동 속에 놓인 뭉툭한 물체 뒤의 후류는 오랜 동안 자연과학이나 공학적으로 의의가 있는 주제가 되어왔으며 이에 대한 연구에 많은 진전이 있었다. 특히 Roshko[1]에 의해 전단유동에 있어서의 와에 대한 거대구조가 밝혀진 이후로 뭉툭한 물체 후류에 있어 이의 응용과 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 그 중에서 공학적인 중요성, 실험의 간편성, 그리고 후류구조의 조직 등의 이해 및 원주후류에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 가시화에 의한 후류구조의 규명에서부터 열선(hot-wire)등에 의한 유동장의 계측 등 다양한 방식에 의해 수행되어 졌고, 또한 광범위한 레이놀즈수에 있어서의 유동에 대해 방대하게 연구가 수행되었다[2].

Williamson[3] 은 그의 Review에서 넓은 범위의 레이놀즈수에서의 유동특성에 대하여 연구하였는데, 특히 레이놀즈수 190에서 1000까지를 후류천이 (wake transition) 영역으로 분류하면서 레이놀즈수와 스트로할수의 관계에서 2개의 불연속적인 영역이 존재하고 불안정성이 증가하여 와류가 3차원 구조를 가지고 있음을 보였다. 이 두 개의 불연속영역은 레이놀즈수 190 근처에서 A 모드, 260근처에서 B 모드로 전환하는 점으로, 두 모드는 2차 와류(secondary vortex)의 공간적 구조 및 불안정성 발생원리에 있어 차이를 보였다. 이러한 와 구조의 발달과정에 대한 정량적 계측해석은 실린더 후류 유동이 비정상적이며 자연 발생적이라는 점에서 매우 어려운 일이다. 또한, 와류 형태의 과도특성이 있어 기존의 열선유속계와 레이져 도플러유속계(LDV) 같은 점 측정방법으로는 전체적인 유동구조를 파악하기에 한계를 지니고 있다.

최근 PIV(입자영상유속계) 계측 기법의 발달과 함께 와 구조의 공간적 분포형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. Chyu 와 Rockwell[4] 은 난류 유동에서의 주

유동 방향 와의 형태를 제시하였고, Wu 등[5]은 종방향 와 구조를 계측하였다. 하지만, 이들의 연구는 모두 순간 유동장의 결과를 바탕으로 하였다. Lourenco 등[6]은 처음으로 PIV데이터를 이용하여 위상평균 유동장을 측정하였다. 그들은 낮은 샘플링 주기로 인해 유동장 내의 순환과 시간 정보를 이용하여 Whittaker보간법으로 재구성된 속도장을 위상평균에 사용하였다. 또한 김 등[7] 은 시간 정보에 의존하지 않고 랜덤 샘플링으로 얻은 속도장을 와 중심과 순환으로부터 위상을 추출하는 기법을 제시하였다. 그러나 2차원성이 강한 x-y 평면에서의 위상평균 유동장만 제시되어 3차원 와 구조를 파악하는데는 한계를 지닌다. 성 등[8]은 Cinematic PIV 기법을 이용하여 x-y 평면뿐만 아니라 z-x평면에서도 위상평균 속도장을 구하여 공간, 시간에 따른 근접 후류의 3차원 유동 특성을 파악하였다. 그들은 2차 와류의 위치가 z-x 평면에서는 z축에 고정되어 있지 않고 불규칙적인 것을 고려하여, z축 방향의 와도 상관(vorticity correlation)에 의한 z축 방향의 위치교정기법을 위상평균기법과 함께 도입함으로써 2차 와류의 3차원 공간적 및 시간적 특성을 파악하였다. 그러나, 그들은 2차원 단면상에서 얻어낸 정보를 이용하여 이들 정보를 재구성함으로써 와구조의 공간적 시간적 특성을 파악하고자 하였기 때문에 와의 구조가 보다 3차원적으로 보다 복잡하게 발생할 경우에는 계측의 가능성이 희박하다. 즉, 와의 구조해명을 위해서는 얻어낸 속도정보에 대하여 유동장 공간전체 및 시간 연속적인 계측이 필요함을 의미했다.

Chang 와 Tattersoon[9], Chang 등[10]은 Bolex Stereoscopic lens를 장비한 16mm 율동사진 카메라를 이용하여 다중 사진기법으로 실용적인 속도계를 고안하여 3차원성이 강한 난류유동의 계측에 성공하였으나 유동장을 향하는 두 대의 카메라의 시선각이 작음으로 인한 깊이 방향의 정확도가 빈약하였다. 이를 극복하기 위해 Yamakawa 와 Iwashige[11], Racca 와 Dewey[12], Adamczyk 와 Rimai[13], Kobayashi 등[14]은 두 대의 카메라를 유동장에 대하여 직각 방향으로 설치함으로써 카메라의 좁은 시선각으로 인한 깊이 방향의 계측오차를 줄였다. 그러나, 이 방법 또한 채널유동과 같은 단순한 유동의 계측에 있어서 유리하였으나, 복잡한 유동장의 계측에는 카메라를 다양하게 배치해야 함을 보여주었다. Kasagi[15], Nishino[16], Papanroniou 와 Dracos 등[17]은 고속으로 데이터를 처리하

며 카메라의 설치 위치를 섬세히 고려함으로써 계측오차를 줄이는 방안을 강구하였다. Kent 와 Trigui 등[18]은 폭발이 없는 연소실 내부의 유동에 3차원 PTV를 적용하였다. Kasagi 등[19]은 3대의 카메라시스템을 사용하여 2차원 채널유동장에 대하여 일회의 계측으로 약 400개의 순시속도벡터를 얻어내었고, Mass 등[20]은 3대의 카메라시스템으로 채널유동장에 대하여 약 1000개의 순시속도벡터를 얻어내었다. Malik 등[21]은 4대의 카메라시스템으로 탱크내의 교반기 유동장에 대하여 약 850개 이상의 순시속도벡터를 얻어내었다. 도 등[22]은 확률일치방법(Ballard and Brown, 1982)을 3차원 PTV계측법에 적용함으로써 후향단(backward step) 유동장에 대하여 약 400개 정도의 순시속도벡터를 얻어내었으며 방대한 량의 정보를 처리함으로써 후향단 유동에 대한 난류통계량을 파악하였다. 그러나, 난류통계치는 시간연속적인 유동구조의 규명에는 도움이 되지 않는다. Nishino 등 은 채널유동에 대한 수많은 횟수의 실험을 통하여 난류통계치를 제시하면서 난류유동의 구조에 대한 해명(와의 거동)을 위해서는 700개 이상의 3차원 속도벡터가 필요함을 제시하였다. 본 연구의 대상이 되는 원주 근접후류는 채널유동이나 후향단 유동과는 달리 그 메커니즘이 매우 복잡하여 이에 대한 정량적 해석을 위해서는 공간에 걸친 3차원적인 속도벡터의 개수가 적어도 700개 이상이 되어야 함을 암시한다.

3차원 PTV 계측법으로 얻어내는 속도벡터의 개수는 사용되는 알고리듬의 종류에 따라서 매우 차이가 있다. Kobayashi 등 은 2대의 카메라를 이용하여 이들 2대의 카메라로부터 얻어지는 2차원 속도벡터들을 스테레오매칭법으로 합성함으로써 순시 3차원 속도벡터를 얻어내었는데[23](시간-공간탐색법이라 함), 일회의 계측으로 약 100개 정도의 3차원 속도벡터를 획득하고 있다. 이들 방법은 속도벡터를 8시각(eight consecutive time)에 걸쳐 얻어내기 때문에 복잡한 유동의 계측에는 사라지게 되는 추적입자들이 많아 속도벡터 회복률이 낮은 결점을 앉고 있다. 이를 개선하기 위하여 도 등은 확률일치방법[24]을 도입하게 되었다. 이들은 단일 프레임의 화상에 AOM(Acousto-Optical Modulator)[25]이라는 장치를 사용함으로써 고속유동장에서도 3차원 속도계측이 가능하게 함으로써 사라지는 입자들의 개수를 줄임으로써 약 400개의 3차원 순시속도벡터를 얻어내었다. Okamoto[26]는

추적입자들간의 스프링상수개념을 도입함으로써 약 400개의 3차원 순시속도벡터를 얻었다. 전술과 같은 연구자들의 성과를 포함하여 여타 다른 연구자들이 제시한 계측알고리듬은 비교적 단순한 유동장의 경우에 대하여 효과적으로 유동구조를 해명하였다. 그러나, 원주 근접후류와 같이 유동의 구조가 보다 복잡한 유동장의 경우에는 기존의 계측알고리듬으로는 유동구조를 정량적으로 해명하기란 쉽지가 않다.

한편, 유전적 알고리듬은 자연세계의 진화 현상인 적자생존(survival of the fittest)에 기초한 최적화 알고리듬으로, 주어진 문제의 탐색공간 내에서 최적화할 목적 함수에 대해 초기 해로부터 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)거쳐 새로운 자손을 인공적으로 만들어 내고, 자연의 생물유전을 모방한 연산자들을 반복적으로 적용하여 적합한 해를 탐색하는 방법으로서 최근 시스템의 최적화 문제에 많이 응용되고 있다.

Yamada 등[27]은 두 프레임간의 패턴의 매칭에 유전적 알고리듬을 이용하여 속도를 계측하는 알고리듬을 개발하였고, Ohyama 등[28]은 모든 입자의 이동거리가 최소가 되도록 적합도를 정의한 유전 알고리듬을 이용하여 2차원 속도 분포계측에 성공하였고, 이러한 유전적 알고리듬을 3차원 계측에까지 확장하여 적용하였지만 속도벡터 회복률이 저조할 뿐만 아니라 유동의 계측대상도 단순한 유동형태이기 때문에 개선의 여지가 있었다. Kimura 등[29]은 유동의 패턴을 적합도로 하는 유전적 알고리듬을 구축하여 2차원 속도분포계측을 하였으나 다른 계측알고리듬(확률일치법 등)에 비하여 속도벡터 회복률이 좋지 않았다. 도 등[30]은 유전적 알고리듬을 적용과정에서 우성집단의 표본을 만든 뒤 열성으로 분류되는 입자집단을 형성시켜 이들 열성집단의 입자들을 속도벡터 대응의 후보로 간주함으로써 2차원 강제와류의 계측에 있어 속도벡터 회복률이 100%에 가깝게 성과를 올렸다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구에서는 전 절에서 기술한 바와 같이 기존의 계측알고리듬의 단점인 저조한 속도벡터 회복률을 극복한 후 이를 공학적 의의가 높은 원주 근접후류의 2차 와류의

거동을 정량적으로 파악하는 것을 연구의 목적으로 한다.

이를 위하여서는 전술과 같이 최적화 문제에 적용이 되고 있는 유전적 알고리듬을 도입하고자 한다. 이 과정에서 도 등[30]이 제시한 우성열성분류법(대응되는 입자들의 집합을 우성집단으로 대응되지 않는 입자들의 집합을 열성집단으로 분류하는 방법)에 의하여 대응입자 후보에서 제외되는 열성집단에 대하여 재차 생존의 기회를 제공함으로써, 3차원 PTV계측법의 계산과정에서 발생할 수 있는 에러(입자중심의 오차문제, 입자의 겹침문제 등)를 최소화 하고자 한다.

제 2 장에서는 일반적인 3차원 PTV계측시스템에 대하여 기술되는데, 3차원 계측법의 원리와 속도벡터를 얻기 위한 화상처리의 과정인 전처리과정, 화상의 보정, 도심의 검출과정을 소개하고, 제3장에서는 3차원 PTV계측법에 있어서의 유전 알고리듬의 적용방법에 관한 개체와 집단 그리고, 유전 연산자 등에 관하여 다루고자 한다. 본 연구에서 구축한 유전적 알고리듬 기반 3차원 PTV계측법(3D-GA-PTV)의 유효성을 검증하기 위하여 VSJ(Visualization Society of Japan, http://www.vsj.or.jp/piv)에서 제공하고 있는 평판 충돌제트에 대한 LES 데이터를 이용하여 가상이미지를 구현하고 이 가상이미지에 대하여 실제로 계측 적용함으로써 본 계측법의 성능을 평가하고자 한다. 또한, 계측의 신뢰도를 평가하기 위하여 계측오차의 불확실성 해석을 수행하고자 한다.

제 4 장에서는 구축한 3D-GA-PTV를 원주 근접후류에서 발생하는 2차 와류계측에 적용하고자 한다. 따라서, 이 장에서는 계측시스템, 계측방법 및 실험조건에 관한 사항을 다루고자 한다.

제5장에서는 계측결과 및 검토과정으로 원주 근접후류에서 발생하는 2차 와류의 유동구조를 계측하기 위하여 설정된 측정영역내의 각 단면에서의 평균 및 순시속도장, 난류강도, 난류운동에너지, 레이놀즈 응력의 분포 등을 정량화 하고자 한다.

제 6 장은 결론부로서 본 연구에서 구축된 3D-GA-PTV가 복잡한 구조의 유동장 계측에 매우 유용하게 됨을 밝히고자 한다.

제 2 장 3차원 PTV 속도장 측정시스템 및 구성요소

2.1 유동장 가시화장치의 구성

Fig. 2.1은 유동입자의 화상처리를 이용한 속도장 측정 실험에 적용된 시스템을 나타낸 그림이다. 계측시스템의 구성은 3대의 CCD카메라(768×494 pixels), 이미지그래버(512×512 pixels, 256 gray levels), 레이저(500mW), 3대의 비디오, 그리고 32bit 호스트 컴퓨터를 포함하고 있다.

3대의 카메라로부터의 영상은 호스트컴퓨터에 장착된 이미지그래버(Ditect 64)로 보내져 아날로그에서 디지털로 전환되어 256gray levels(512×512)로 저장된다. 이미지그래버의 메모리에 저장된 이미지를 다시 호스트컴퓨터에 저장한다. 본 실험에 사용된 이미지그래버는 64 Mega bytes의 RAM이 장착되어 있으며, 카메라에 의해 동기된 R(빨간색), G(녹색), B(파란색)이미지를 동시에 실시간으로 64장씩 저장 할 수 있다. 입자의 3차원위치 계산을 하기 위해 먼저 다음에서 설명할 카메라의 교정작업을 실시한다. 교정작업을 마치면, 이미지상에서 입자의 도심을 찾는 작업을 행한다. 정확한 도심을 구하기 위해 입자 외의 잡음성분 제거 등과 같은 전처리 과정이 수행한다. 전처리 과정을 마치면 입자의 3차원 위치계산, 동일입자의 쌍을 구하는 과정을 수반한다. 본 연구에서는 최종 3차원 벡터를 구할 때까지의 모든 처리과정을 구축된 계측 시스템 프로그램에 의해 자동으로 처리하였다.

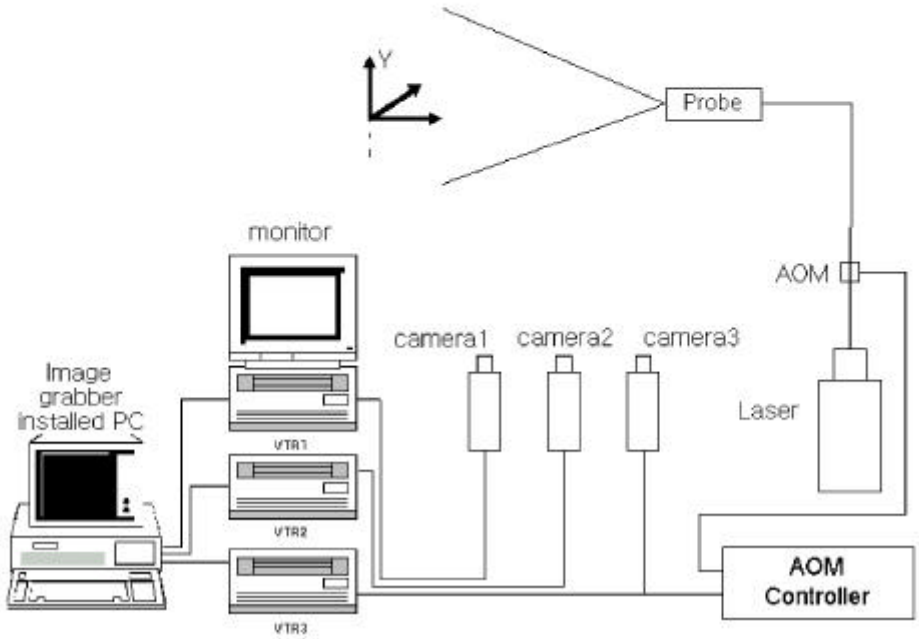


Fig. 2.1 Experimental arrangement for 3D velocity measurement

2.2 카메라의 교정작업

Fig. 2.2는 3차원 위치계측의 절차를 보여주고 있다. 추적 입자의 3차원 위치를 계산하기 위해서 카메라의 위치, 방위, 초점 길이, 그리고 이미지의 왜곡 계수와 같은 각각의 카메라의 매개변수(標定요소라고도 함)를 결정해야 한다. 이들 매개변수를 구하는 것을 카메라 교정작업이라고 한다. 카메라 2대 또는 3대를 이용하여 이미 알고있는 교정기의 3차원 위치정보를 이용하여 각각의 카메라의 교정작업을 행하고, 계산된 매개변수를 이용하여 입자의 3차원 좌표를 계산한 다음 본 연구에서 구축된 유전적 알고리듬 기반 3D-PTV 계측알고리듬에 의해서 3차원 속도벡터를 얻는다. 카메라의 교정작업을 위해서 Fig. 2.3의 그림과 같이 100mm (가로)×70mm(세로)×60mm (높이)의 교정기를 제작하여 그 위에 직경이 1mm인 핀의 끝단에 지름이 0.6mm인 구를 만들어 3차원적으로 배치하였다. 핀의 식별을 쉽게 하기 위하여 핀의 끝단에 위치해 있는 구 주위에 흰색의 도료를 발랐다. 기준점들의 높이(Y)는 교정기의 상면으로부터 5.0mm에서 60mm 까지 각각 다른 길이로 40개를 제작하였다. 교정기의 3차원 위치는 공인된 검정기관을 통하여 1/1000 mm 오차 이내까지 계측하여 얻어낸 결과를 이용하였다. 평판 위의 교정점의 절대좌표의 원점은 원주의 절반 폭에 해당되는 점 X, 원주가 설치된 중심으로부터 하류방향의 위치 Y=2.500D, 원주중심의 수평선상 Z에 일치시켰다.

계측시에는 본 연구에서 유동계측의 대상이 되는 원주 근접후류부에 후향단의 상기의 기준점 (X=0, Y=0, Z=0)에 대하여 상대적으로 계산하였다. X, Y, Z 좌표계는 교정기에서 사용한 좌표계와 동일하다. 교정기에서의 기준점은 교정기의 중심으로 정의하였으며, 좌표계는 Fig. 2.1에 나타내었다. 카메라 교정기의 Y축 방향은 Fig. 2.3의 평면에 수직이다. 교정기는 Fig. 2.1과 동일한 좌표계를 위하여 원주 근접후류 계측영역부에 설치되며, 교정기의 기준점과 원주좌표계(절대좌표계)와의 기준점의 상대적 위치는 이미지상에 나타난 원주의 형상좌표를 이용하여 구하였다. 절대좌표계(X, Y, Z)와 카메라의 외부 파라메타(X_0, Y_0, Z_0) 그리고 사진좌표(x, y)의 관계를 Fig. 2.4에 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3차

원적인 공간상에 위치해 있는 표적 P는 투영위치인 사진좌표점 P_i에 의해서 표현된다. 카메라 투영중심 $O(X_0, Y_0, Z_0)$, 투영점 $P_i(x, y)$ 와 표적 $P(X, Y, Z)$는 동일선상에 놓여있다는 공선조건으로부터 식(2.1)과 같은 공선식이 성립된다.

$$
\begin{aligned}
x &= -\, c\frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\
y &= -\, c\frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

여기서 a_{ij}는 회전행렬요소이며, 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
a_{11} &= \cos\phi\cos\kappa, \quad a_{12} = -\cos\phi\sin\kappa, \\
a_{13} &= \sin\phi \\
a_{21} &= \cos\omega\sin\kappa + \cos\omega\sin\phi\cos\kappa, \\
a_{22} &= \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\phi\sin\kappa, \\
a_{23} &= -\sin\omega\cos\phi \\
a_{31} &= \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\phi\cos\kappa, \\
a_{32} &= \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\phi\sin\kappa, \\
a_{33} &= \cos\omega\cos\phi
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

여기서 $\Delta x, \Delta y$는 비측량용 카메라에 대한 렌즈왜곡 보정량이고 식(2.3)과 같다.

$$
\begin{aligned}
\Delta x &= x_0 + \tilde{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\
\Delta y &= y_0 + \tilde{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\
r^2 &= (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2)/c^2 \\
\tilde{x} &= x - x_0, \quad \tilde{y} = y - y_0
\end{aligned}
\tag{2.3}
$$

여기서, x_0와 y_0는 이미지 중심으로부터 주점위치의 이동량을 나타낸다. 교정점의 사진좌표는 그 이미지의 도심들로 정의된다. 카메라의 외부매개변수(X_0,

Y_0, Z_0, ω, ϕ, κ)와 내부매개변수(c, x_0, y_0, k_1, k_2)는 최소자승법과 축차근사해법[31]을 적용하여 구하였다. 이들 카메라 파라메타의 계산을 위한 기준점의 수는 교정기의 40개의 핀이 모두 3대의 카메라에서 동시에 보이도록 설치하여 사용하였다.

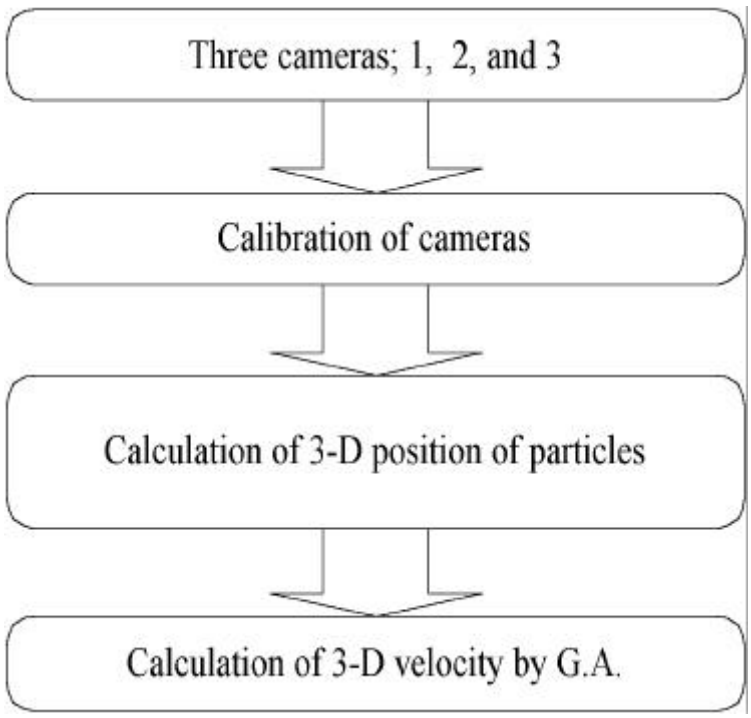


Fig. 2.2 Procedure of 3D-PTV measurement

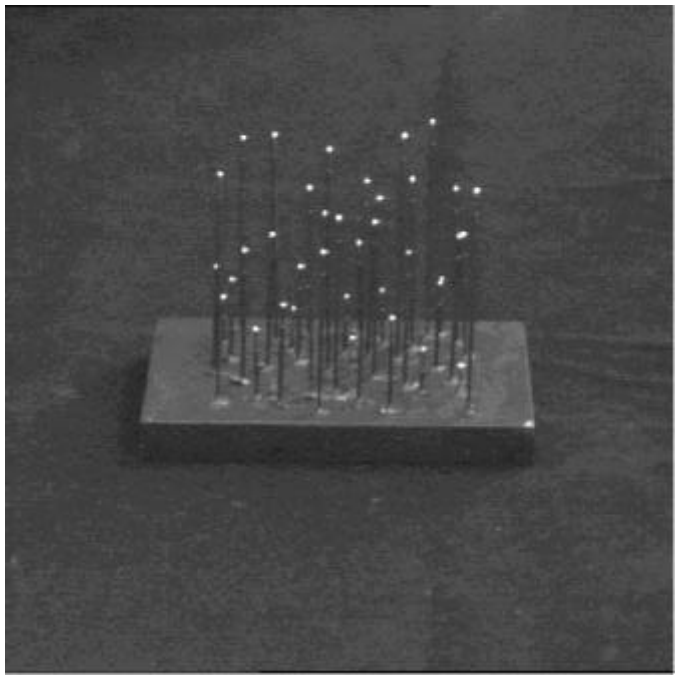


Fig. 2.3 Picture of camera calibrator for GA-3D-PTV measurement

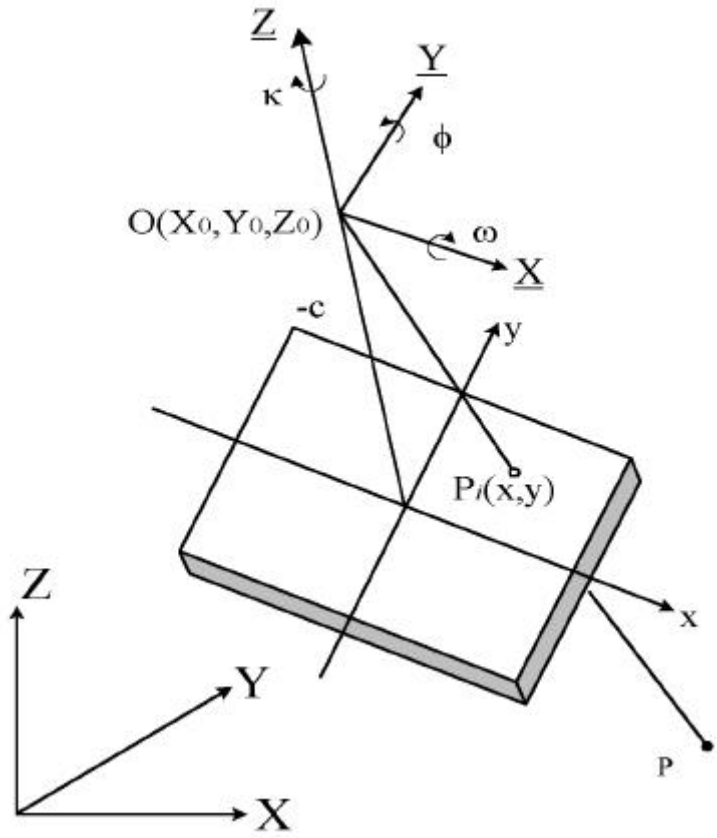


Fig. 2.4 Coordinate relation of camera

2.3 3차원 위치 계측의 원리

3대의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라의 매개변수가 구하고 나면 교정된 카메라를 통하여 가시화된 화상을 이미지그래버로 저장하여 추적입자들의 사진좌표를 구한다. 저장된 이미지는 연속된 두 장의 짝수필드와 홀수필드로 분리하고, 분리된 각각의 필드에 대해 주변입자들의 밝기정보에 대한 평균 보간 작업을 실시함으로써 하나의 완전한 이미지를 얻는다. Fig. 2.5에 본 연구의 원주후류의 실험에서 사용된 3대의 카메라에 의해서 얻어진 화상의 예를 나타내며 카메라교정기의 화상을 나타낸다. 각 입자들의 평균직경은 4 9화소 정도였다. 입자영상의 밝기정보(gray level 값)가 다르기 때문에 단계적으로 계조치(階調値,gray level)를 바꿔가면서 입자의 도심을 계산하였다.

카메라 파라메타로부터 입자의 속도를 얻기 위하여 각 카메라들간에 동일한 입자를 대응시키는 과정과 3차원 위치계산의 과정이 필요하게 된다.

Fig. 2.6은 3차원 위치계측법의 원리를 설명하기 위한 그림이다. 입자들의 3차원 위치는 Fig. 2.6에 보이는 것처럼 3대의 카메라로부터 투영선에 대응하는 교차점으로 구해진다. 각 카메라의 공선식(colinear)은 아래 식(2.4)으로 주어진다.

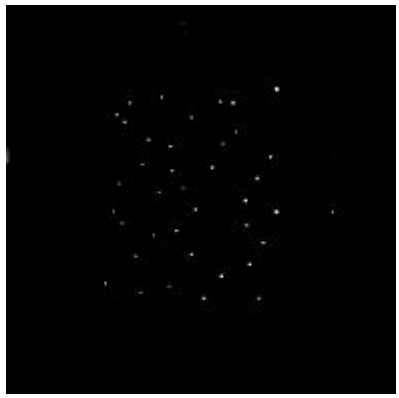
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

여기서, X, Y, Z는 사진좌표 x, y로부터 변환된 절대좌표이다. 그리고 그 외의 파라메타들은 전 절에서 언급한 것과 같다. 입자의 3차원 위치를 계산하기 위하여 이미지에 보여진 입자들 중에서 대응하는 쌍을 찾아야 한다. 에피폴라 기법[14)]을 이용하여 입자들의 대응하는 쌍을 구하는 작업을 행하였다. 입자들에 대한 교차점은 각 카메라의 사진좌표점과 투영중심이 이루는 공간직선의 교점으로 정의하였다. 대응하는 쌍의 결정은 선택된 이미지에서 가장 짧은 거리를 가진 입자의 쌍과 3대의 카메라의 투영선들의 계산에 의하여 이루어진다.

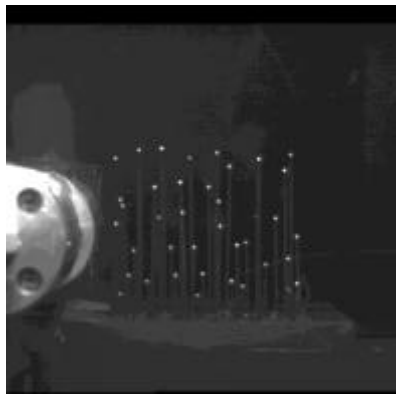
사진좌표의 대응하는 쌍이 구해지면 각 카메라에 대한 사진좌표 $p_i(x_1, y_1)$, $p_i(x_2, y_2)$, $p_i(x_3, y_3)$ 는 절대좌표계의 좌표로 변환되며 입자의 3차원 위치는 다음의 식으로 계산된다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{3}\left[\begin{pmatrix} X_{01} + X_{02} + X_{03} \\ Y_{01} + Y_{02} + Y_{03} \\ Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} \end{pmatrix} + t_1\begin{pmatrix} Xp_1 - X_{01} \\ Yp_1 - Y_{01} \\ Zp_1 - Z_{01} \end{pmatrix} + t_2\begin{pmatrix} Xp_2 - X_{02} \\ Yp_2 - Y_{02} \\ Zp_2 - Z_{02} \end{pmatrix} + t_3\begin{pmatrix} Xp_3 - X_{03} \\ Yp_3 - Y_{03} \\ Zp_3 - Z_{03} \end{pmatrix}\right] \tag{2.5}$$

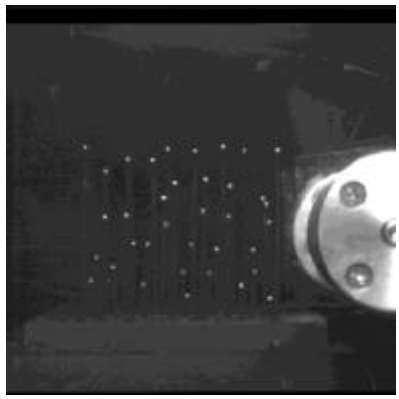
여기서, X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}는 카메라의 투영중심이며, Xp_i, Yp_i, Zp_i $(i = 1, 2, 3)$ 는 사진좌표계가 절대좌표계로 변환된 후의 좌표이다. 일반적으로 두 공선식이 공간상에서 한 점에 완전히 교차하는 것이 불가능하므로 t_1, t_2, t_3는 하나의 해를 가지지 않는다. 따라서 이들 값은 최소자승법을 이용하여 구하였다.



(a) by camera 1



(b) by camera 2



(c) by camera 3

Fig. 2.5 Raw images captured by the three cameras

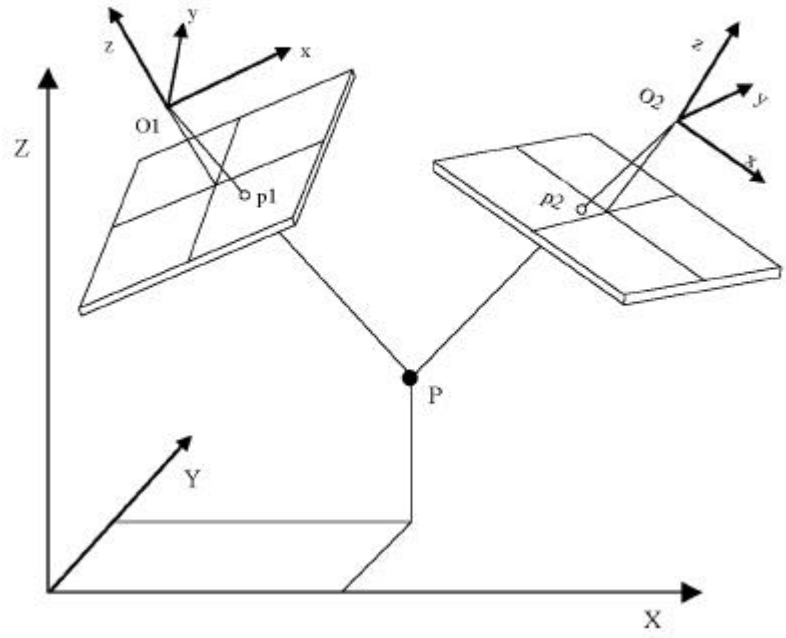


Fig. 2.6 Definition of 3D-particle's position

2.4 화상 처리

2.4.1 전처리 과정

본 연구에서 PIV 와 PTV의 알고리즘은 NTSC계열의 카메라의 원리를 이용하고 있다. 1/30초로 저장된 프레임은 화상의 세로방향에 대해서 짝수라인과 홀수라인이 1/60초의 시간해상도를 가지며 분리된 필드 화상의 각각 서로 다른 라인은 보간을 실시하여 하나의 이미지로 만들어 화상처리를 행한다. 이렇게 함으로써 시간해상도를 더욱 짧게 할 수 있다.

입력화상은 일반적으로 잡음성분을 대부분 포함하고 있다. 유동장을 가시화 하는 경우 입자 외의 잡음성분과 배경화상을 제거해야 하는데 그렇지 않을 경우 입자의 처리결과에 많은 에러성분을 포함하게 되는 요인이 된다. 특히, PTV에 의한 속도벡터계측에 있어서 잡음성분은 입자 획득율을 떨어뜨리기 때문에 화상처리 기법을 행하여 잡음성분을 제거하였다. 본 연구에서는 화상에서 잡음성분을 제거를 위하여 해당 화소의 값을 주위의 농도치의 평균값으로 치환하는 방법으로 대상 화상에 따라서 평균치가 아닌 중앙치를 사용하는 미디움-필터 등을 사용하여 화상처리를 행하였다. 또한, 짧은 시간의 이미지라 하더라도 각각의 화상은 같은 밝기의 화상을 가진다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 계조치의 설정을 고정시키지 않고 화상의 밝기가 약간 변한다 할 지라도 입자수는 크게 변하지 않기 때문에 예상되는 입자수를 고정시켜놓고 입자수에 가장 가까운 계조치를 이용하여 입자를 구하였다. 배경화상을 제거하기 위한 방법으로 1/30초의 연속적인 간격으로 얻은 64장의 화상을 2장의 필드로 분리하여 보간한 128장의 필드 화상을 이용하여 배경화상을 만들고 순간화상에서 배경화상을 감산 연산작업을 통하여 배경화상을 제거하였다.

2.4.2 화상의 보정

화상을 저장할 때 카메라를 정확히 수평을 유지하여 입력하는 것은 거의 불가능하기 때문에 대부분의 화상은 카메라의 중심에 대해서 회전된 각도로 저장된다. 따라서 회전된 화상을 보정해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 회전된 화상을 보정하기 위해 실험전에 정확한 위치정보(절대좌표)를 가진 교정판을 실제 실험과 같은 조건하에서 이미지로 저장하여 아래의 절차에 의한 이미지 처리에 의해서 보정을 행하였다. 2차원 회전행렬을 A가 다음과 같을 때,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

원 이미지의 Pixel $A(x, y)$ 가 $B(s_x, s_y)$의 Pixel 값으로 변환식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = \frac{a_{11} s_x + a_{12} s_y + a_{13}}{a_{31} s_x + a_{32} s_y + 1}, \quad y = \frac{a_{21} s_x + a_{22} s_y + a_{23}}{a_{31} s_x + a_{32} s_y + 1} \tag{2.7}$$

이미지상의 굴절량($\Delta x, \Delta y$)을 다음과 같이 정의할 때

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right) \\ \Delta y &= \frac{y}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right) \end{aligned} \tag{2.8}$$

위의 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F(x;a_{11},a_{12},a_{13},\cdots,k_{2}) = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32} + 1} - sx = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32} + 1} - \left(px + \frac{px}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right)\right) \quad (2.9)$$

$$G(y;a_{11},a_{12},a_{13},\cdots,k_{2}) = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32} + 1} - sy = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32} + 1} - \left(py + \frac{py}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right)\right) \quad (2.10)$$

$$r = \sqrt{(px^2 + py^2)}$$

수정 Gauss-Newton 방법을 적용하여 선형화 한 후 변화량에 대해서는 최소 자승법을 적용하여 미지 변수를 구하고 구해진 미지 변수를 이용해서 모든 점에 대하여 이미지 변환을 수행하였다.

2.4.3 입자의 도심의 검출

전술한 절차에 의해서 잡음제거와 배경화상의 제거 같은 전처리를 거쳐 처리된 화상을 2치화한 다음 입자의 도심을 검출하였다. 2치화 작업에 의해서 저장된 이미지의 입자를 구성하는 화소값은 1, 배경부분은 0의 값을 가진다. 이러한 화상정보를 이용하여 단일 입자를 검출하기 위해서 입자로 인식되는 화소의 외곽선을 연결하는 윤곽선추적(boundary trace)을 행하였다. 먼저 래스터 스캔(raster scan) 방향으로 이동해가면서 픽셀의 값이 0 또는 1인가를 조사하고 최초로 1의 값이 위치한 검출위치를 윤곽선 추적의 탐색 시작점으로 한다. 이 픽셀은 입자를 구성하는 화소 중에서 최상 행에서 가장 왼쪽의 픽셀이다. 이 픽셀을 중심으로 인접한 화소는 8개로서 3×3의 마스크를 형성할 수 있다. 이를 좌상의 첫 번째 픽셀로부터 반 시계 방향으로 조사하여 1의 값이 없을 경우 단일입자로 판단하고 만약 입자가 검출되면 이를 중심으로 동일한 방법으로 윤곽선을 추적한다. 다음으로 입자의 윤곽선을 추적하여 단일 입자로 확인되었으면 각각의 입자의 도심좌표를 계산한다. 도심좌표를 구하는 데 있어 윤곽선의 좌표만을 사용할 수도

있으나 속도벡터를 구할 때의 오차성분을 감소시키기 위하여 내부까지 고려하여 입자중심좌표는 면적모멘트 공식에 의해 식(2.11)과 같이 표현된다. 여기서 x_i, y_i는 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표이며, A_i는 그 면적이다.

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \quad , \quad \overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{2.11}$$

제 3 장　유전적 알고리듬 기반 3차원 속도벡터계측

3.1 일반적인 유전적 알고리듬

GA를 사용하기 위해서 주어진 문제에의 특성을 잘 반영할 수 있는 일정한 형태의 자료 구조가 필요하게 되는데 일반적으로 유전자(gene)는 하나의 비트로, 염색체(chromosome)는 유전자들로 구성되는 집합, 그리고 염색체로 이루어진 집합을 집단(population)과 조상과 자손을 나타내는 세대(generation)등이 있다. GA에서 각 염색체는 후보해나 잠재해를 의미하며 개체(individual)이라고도 한다.

주어진 문제가 추구하는 목표는 목적 함수(object function)로 나타내어지며 이를 적합도 함수(fitness function)라고도 하며, 이러한 목적함수에 의해 각 염색체 또는 개체들의 우성과 열성을 판단하게 된다. 초기 개체 집단으로부터 최종해에 접근시키기 위해 수행되는 과정을 유전연산자라 하는데 유전연산자에는 대표적으로 선택, 교배, 돌연변이가 있고, 그 이외에 이주, 격리, 재생산 등을 사용하기도 한다. 주어진 문제에 대해 GA를 적용하기 위해 다음과 같은 5가지 요소를 가정해야만 한다.

○ 문제의 해가 될 가능성이 있는 것의 유전자적 표현 방법
○ 해가 될 가능성이 있는 것들의 초기 개체집단을 만들어 내는 방법
○ 환경의 역할을 수행하는, 즉 “적합도”에 의해 해를 평가하는 평가함수
○ 자손의 합성을 변화시키는 유전 연산자들
○ 유전자 알고리듬이 사용하는 여러 가지 매개변수의 값

(개체집단의 크기, 유전 연산자를 적용시키는 확률 등)

3.2 PTV에서의 유전 알고리듬

3.2.1 유전자적 표현 방법

PTV에서 3차원 속도 벡터 시점과 종점으로 구성되어 있으며, 시점과 종점 모두 카메라 두 대로부터 동일 입자로 인식되는 입자로부터 얻어진 공간 좌표이다. 따라서 3차원 속도 벡터는 카메라의 입장에서 2개의 시점과 2개의 종점을 가지게 된다. 이것으로부터 다음과 같은 염색체를 정의하였다.

Table 3.1 Definition of chromosomes of GA

Camera 1		Camera 2		Fitness	
Start	End	Start	End	3*DE*	C

여기서 카메라에 대한 시점과 종점은 각 영상에 대한 입자의 중심값을 나타내는 정수값이고,

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$$

$$3DE = [DS + DE] \tag{3.1}$$

즉 D는 두점간의 거리를 나타내고, $3DE$는 두직선간의 최단거리를 나타낸다.

3.2.2 초기 개체의 결정

각 카메라에서 획득한 입자의 시점과 종점은 전체유동장의 최대 이동거리를 초과하지 못한다. 따라서 시점을 기준으로 하여 카메라에 대한 2차원 벡터가 될 수 있는 후보들을 결정한 다음 초기에는 임의적으로 여러 개의 후보 중 하나를 벡터로 선택한다. 이러한 과정이 카메라 두 대에서 획득한 영상에 대해 실행한다. 다음 과정은

임의적으로 결정된 두 개의 2차원 벡터를 선택하여 3차원 벡터를 만든다. 이렇게 결정된 3차원 벡터는 시점과 종점에 대한 공간상의 3DE값을 가지게 된다. 이 결과를 가지고 격리라는 유전 연산자를 적용하는데 다음 유전 연산자에서 자세히 설명되어 있다.

3.2.3 목적함수의 설정

유전알고리즘에서 목적함수는 해의 방향을 결정하는 것으로 가장 중요한 요소라 할 것이다. 국소영역안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는 조건으로부터 PIV에서의 오류 벡터의 검출은 다음과 같다.

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f = \frac{-3u(i,j)+4u(i+1,j)-u(i+2,j)}{2\triangle x}$$

$$\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f = \frac{-3v(i,j)+4v(i,j+1)-v(i,j+2)}{2\triangle y}$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b = \frac{u(i-2,j)-4u(i-1,j)+3u(i,j)}{2\triangle x}$$

$$\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b = \frac{v(i,j-2)-4v(i,j-1)+3v(i,j)}{2\triangle y}$$

다음 식과 같이 4영역의 속도발산치($D1$ $D4$)를 계산하고 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터의 판정을 행한다.

$$D1 = \left|\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f\right| \qquad D2 = \left|\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b\right|$$

$$D3 = \left|\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b\right| \qquad D4 = \left|\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f\right| \tag{3.2}$$

대칭인 2조의 영역속도 발산치 ($D1$, $D3$) 혹은 ($D2$, $D4$)는 임의의 역치 DM을 초과하게 되어 오류벡터라고 판단된다. 그러나 판정조건의 성질상 복수의 정보를 사용하기 때문에 오류벡터에 인접한 정상벡터를 이상치로 오판하거나, 와

류가 발생하는 부분 등과 같은 흐름의 변화가 큰 곳에서는 정상벡터를 이상치라고 오판할 가능성이 높다. 이러한 오판정을 최대한 줄이기 위해 4영역 중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판정한다.

$$D(i,j) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} \right| \tag{3.3}$$

단, $\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} = Min\left\{\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f , \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b\right\}$, $\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} = Min\left\{\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f , \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b\right\}$

즉 D(i,j)가 역치값 DM을 넘는 경우 오류벡터라고 판정하게 된다. 위의 식을 3차원에 적용하면,

$$D(i,j,k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z}\right]_{min} \right| \tag{3.4}$$

와 같으나, 유전알고리듬 PTV 계측에서 초기에 모든 속도 값이 임의적으로 가정되었고, 일정한 격자를 가지지 않았기 때문에 속도 변화치가 상대적으로 변화가 큼을 알 수 있었다. 본 연구에서는 윗 식을 다음과 같이 고려하게 되었다.

○ 연속의 식을 적용하기 위해 판단하고자 하는 벡터의 시점과 종점이 가까운 주위 벡터를 선택한다. 경험을 통해 선택영역이 좁으면 알고리듬의 수렴에 충분한 영향을 주지 못하고, 선택영역이 넓으면 주위의 에러벡터 영향이 커짐을 알 수 있었으며, 이러한 점을 고려하여 주위의 10개의 벡터를 주위 속도벡터로 선택하는 방식을 택하였다.

○ PTV에서는 벡터와 벡터사이에 어떤 일정한 간격이 존재하지 않으므로 차분식은 1차식으로 표현되었다.

○ 최종적으로 적합도 C는 다음과 같이 정의되었다.

$$C = \left|\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{min} + \left|\frac{\partial v}{\partial y}\right|_{min} + \left|\frac{\partial w}{\partial z}\right|_{min} \quad (3.5)$$

즉, 의미상으로 주위 벡터와 속도 변화량이 제일 작은 벡터들의 연속성(C)는 작은 값을 가지며 상대적으로 그렇지 못한 개체들은 높은 값을 가지게 된다.

본 연구에서 $3DE$와 C가 낮은 개체들이 높은 적합도를 가지게 된다. 이러한 적합도는 유전 연산자들에 의해 사용되어지는데, 적합도를 둘로 나눈 것은 이러한 적합도가 서로 다른 역할을 하기 때문이다. 자세한 것은 유전 연산자에서 설명되었다.

3.2.4 유전연산자의 사용

본 연구에서는 유전 연산자로 격리(isolation), 이주(migration), 교배(crossover) 및 재생산(reproduction)을 사용하였다. Fig. 3.1은 유전연산자를 설명하고 있고, Fig. 3.2은 본 연구에 쓰인 유전 알고리듬의 순서도이다.

하나의 염색체는 총 4개의 입자가 임의적으로 선택되어지고 이러한 선택에 대한 $3DE$ 값을 가지게 된다. 이러한 $3DE$ 값을 기준으로 유전 연산자중 격리(isolation)를 적용하게 된다. 격리는 열성인 개체를 집단에서 배제하는 연산자로서 주어진 최대 오차를 넘는 모든 개체를 집단으로부터 배제하게 된다.

격리 연산후 다시 살아남은 개체들로부터 3차원 속도에 대한 C적합도를 계산하게 된다. 이러한 C를 기준으로 열성으로 판단된 벡터들에 대해서는 다시 재생산(reproduction)을 하게 된다. 재생산은 각 카메라에 대한 시점을 고정시켜두고 종점에 대한 임의적 선택을 수행한다.

위의 과정이 끝나면 개체간의 교배(crossover) 과정을 거친다. 교배는 카메라에 대한 2차원 벡터를 고정한 상태에서 $3DE$를 기준으로 하여 개체간의 대응되는 카메라간의 데이터를 바꿈으로서 이루어진다. 교배된 개체의 $3DE$가 한계값을 넘

을 경우 이 입자 또한 배제하게 된다.

위의 과정동안 배제된 데이터들은 다시 초기 개체생성을 수행하여 집단안으로 되돌려 보내는데 이러한 과정이 이주(migration)연산이다. 본 연구에서는 $3DE$의 한계값을 0.5, 교배율은 10%를 주었으며, 입자의 개수에 따라 10 15세대(반복횟수)를 사용하였다.

참고로 본 연구에서는 유전 알고리듬의 대표적인 연산자인 돌연변이를 사용하지 않았는데 그 이유는 돌연변이의 역할이 국부적인 해의 수렴을 막기 위한 것이며, 본 연구에서는 수렴속도를 높이기 위해 초기에 입자의 후보집단을 선정해 두고 개체의 생성은 그 안으로 제안하였기 때문에 이주 연산자 만으로도 충분한 해를 구할 수 있었기 때문이다.

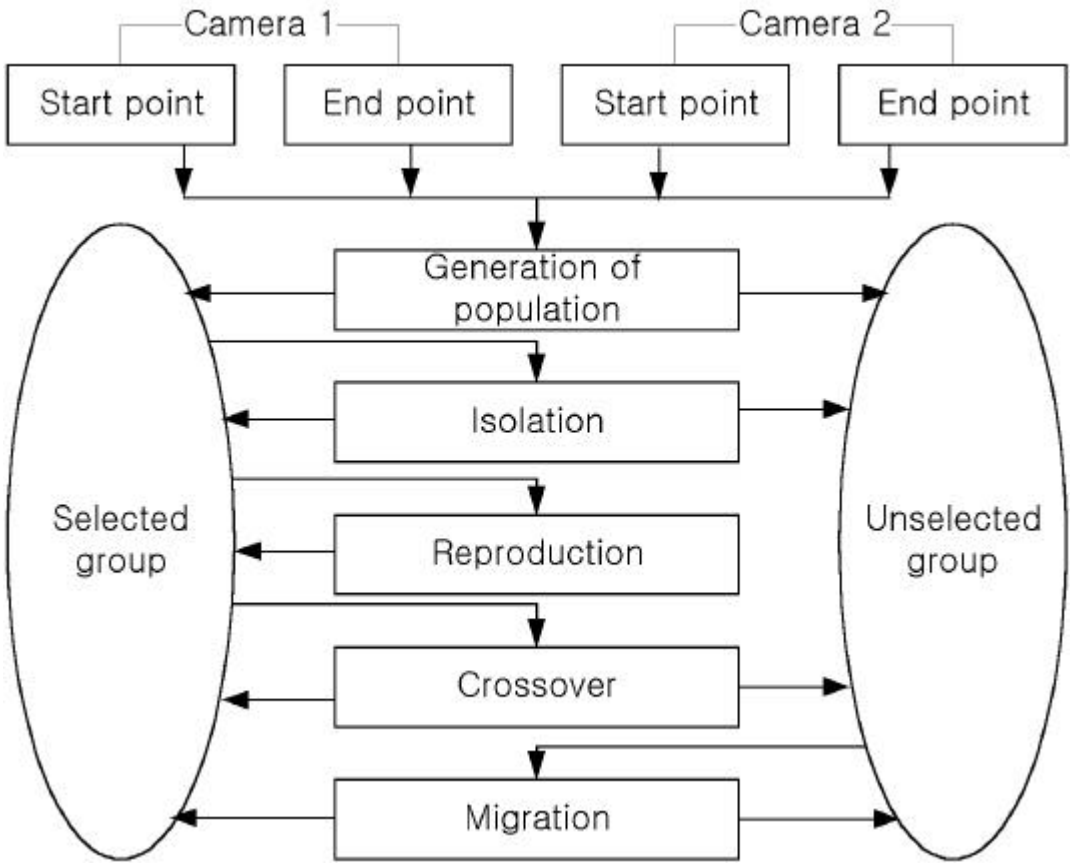


Fig. 3.1 Definition of operators in GA-3D-PTV

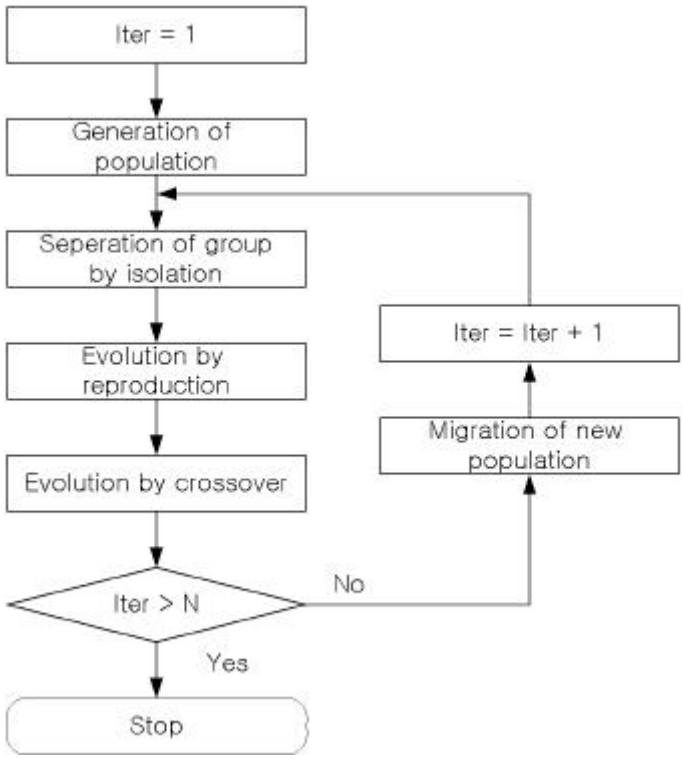


Fig. 3.2 Flow chart of GA-3D-PTV calculation process

3.3 후처리 과정

계산되어진 속도벡터는 대부분 에러벡터가 포함되어있다. 특히, 고속의 유동장에서는 처리할 이미지간에 사라지는 입자, 완전히 제거되지 않은 잡음성분에 의한 원인 등 여러 가지 원인에 의해서 에러벡터가 발생할 수 있다. 이러한 에러벡터를 제거하지 않고 후처리를 행하면 주변벡터에까지 영향을 미친다. 본 연구에서 PIV에 대해서 에러벡터를 제거하는 알고리듬으로 유동의 연속성을 기본으로 한 알고리듬을 이용하여 에러벡터를 제거하였다[32]. 임의의 점 P의 벡터를 포함함으로서 유동의 연속성이 만족되지 않는 경우, 즉 D의 값이 어떤 기준치의 DM 값보다 클 경우 점 P의 벡터는 에러벡터로 판정한다.

$$D(i,j) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{min} \right| + \left| \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{min} \right| \tag{3.6}$$

$$X \text{ 방향} \quad \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{min} = Min \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\}$$

$$Y \text{ 방향} \quad \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{min} = Min \left\{ \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f, \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right\}$$

계측된 순간 속도벡터에 포함 되어있는 서로 잘못 대응된 3차원 속도벡터를 제거하는 방법으로 본 연구에서는 식(3.7)을 이용한 통계적인 방법으로 이들 오류벡터들을 제거하였다. 이를 위하여 계측영역 안의 모든 계측된 벡터에 대하여 조사하였고, 영역내의 벡터에 대한 표준편차를 계산한 다음 Tomson's value, τ를 이용하여 이상(異狀)벡터를 제거하였다[33].

$$S = \left[\sum_{k=1}^{N} (X_k - \overline{X})^2 / (N - 1) \right]^{1/2} \tag{3.7}$$

$$\overline{X} = \sum_{k=1}^{N} X_k / N$$

여기서, S 는 표준편차, N은 측정횟수, $\overline{X}$는 측정치 X_k의 평균치이다.

설정한 영역의 데이터 X_k 와 설정한 영역의 데이터의 평균치 $\overline{X}$ 의 차 ($\sigma = |X_k - \overline{X}|$)를 구하여 S 와 τ값을 곱한 값을 비교하고 " $\sigma \geq \tau S$ "을 만족하는 X_k를 이상치로 정한다. 입자의 밀도에 따라 경험적으로 처리할 영역의 설정을 달리하여 위의 작업을 여러 번 실시하여 에러벡터를 제거한다. PIV에서는 에러벡터를 제거하고 제거된 자리를 보충하기 위한 보간작업이 필요하게 된다. PTV에서 또한 얻어지는 속도벡터는 유동장에 불규칙하게 분포하고 있으며, 이들의 속도값을 이용하여 유동장의 정보를 정량적으로 평가하기 위해서는 반드시 격자상의 속도값으로 보간을 행하여야 한다. 이와 같이 PIV나 PTV에서는 어느 경우에나 데이터의 보간이 매우 중요하며 최종적인 결과의 신뢰도에 커다란 영향을 미친다. Gaussian Window[34]를 설정하여 보간된 각각의 순간 벡터를 평균하여 평균 속도장을 계산하고 순간벡터에서 평균벡터를 뺀 난동속도성분을 이용하여 난류 통계치를 계산하였다. 본 연구에서 구축된 GA-3D-PTV에서 최종적으로 계산된 순간 3차원 벡터는 한번의 계측으로 약 1100개 정도를 얻었다. 공간상에서 구해진 모든 벡터들이 임의의 위치를 가지는 것으로부터 공간적 격자점상에서 속도벡터를 얻기 위하여 식(3.8)에 의한 Gaussian Window를 적용하여 보간을 실시하였다.

$$u_i(x_{i,}y_{i,}z_i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_0}\gamma_k u_k}{\sum_{k=1}^{N_0}\gamma_k}$$

$$v_i(x_{i,}y_{i,}z_i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_0}\gamma_k v_k}{\sum_{k=1}^{N_0}\gamma_k} \qquad (3.8)$$

$$w_i(x_{i,}y_{i,}z_i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_0}\gamma_k w_k}{\sum_{k=1}^{N_0}\gamma_k}$$

단, $\gamma_k = \exp\left(-\frac{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}{h^2}\right)$

가중계수 γ_k의 합은 항상 1이고, 계산에서 윈도우의 크기 h=3mm로 하였다.

3.4 오차해석

개발된 계측시스템의 계측오차는 여러 가지 복합적인 요인들이 있으나 계측에 결정적인 영향을 미칠 수 있는 요소로서는 3차원 위치계측에서의 오차, 두 시각 사이에서의 3차원 이동거리오차, 입자의 추종성에 기인하는 오차 등으로 크게 3가지의 요인으로 나누어 질 수 있다. 카메라의 표정요소와 사진좌표간의 강한 비선형성으로 인하여 3차원 위치계측의 오차를 추정하기란 쉽지가 않다. 따라서, 3차원 위치계측에 있어서의 오차는 40개의 기준점의 절대좌표와 개발된 계측시스템으로 계측하여 얻어낸 절대좌표와의 값을 비교함으로서 정량적으로 평가하기로 한다. 즉, Table 3.2에 나타나 있는 바와 같이 이들 값들(X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref} : 기준점 절대좌표, X_{calc}, Y_{calc}, Z_{calc} : 계측된 절대좌표)의 차의 표준편차, Sx, Sy, Sz를 X, Y, Z축에 있어서의 3차원 위치계측의 불확실성으로 보았다. 3차원 속도벡터에

대한 계측의 불확실성은 이동거리의 불확실성과 시간간격의 불확실성에 의존하는데, 시간간격의 불확실성은 카메라의 촬영시간간격에 있어서의 불확실성과 관련하므로 대개는 무시할 정도로 작다고 볼 수 있으므로, 3차원 속도벡터에 대한 계측의 불확실성은 이동거리의 불확실성에 의존한다고 보았다. 그리하여, 총체적인 속도벡터계측에 있어서의 불확실성은 다음 식으로 정리될 수 있으며 그 값은 0.21mm이 된다.

$$U_{RSS} = [(2Sx)^2 + (2Sy)^2 + (2Sz)^2]^{1/2} \quad (3.9)$$

본 연구에서의 계측영역인 X(-40 40㎜), Y(-50 50㎜), Z(0 60㎜)에 대해 카메라의 영상 두 장 사이에서의 상대적 오차는 1% 미만인 것을 알 수 있다.

Table 3.2 Errors of three-dimensional geometrical measurement

NO	X_{calc} - X_{ref}	Y_{calc} - Y_{ref}	Z_{calc} - Z_{ref}	dx	dy	dz
1	-7.74 - -7.75	0.21 - 0.20	6.63 - 6.52	0.01	0.01	0.11
2	-3.81 - -3.84	7.36 - 7.34	13.11 - 13.08	0.03	0.02	0.03
3	4.89 - 4.89	7.19 - 7.18	17.14 - 17.03	0.00	0.01	0.11
4	8.76 - 8.75	0.57 - 0.58	39.68 - 39.70	0.00	0.01	0.02
5	4.16 - 4.16	-6.56 - -6.54	16.07 - 15.91	0.00	0.02	0.16
6	-3.26 - -3.26	-6.31 - -6.31	24.54 - 24.52	0.01	0.00	0.02
7	-17.72 - -17.75	0.83 - 0.84	29.10 - 29.07	0.02	0.01	0.03
8	-8.91 - -8.92	16.99 - 16.94	43.25 - 43.12	0.02	0.04	0.13
9	0.67 - 0.66	19.43 - 19.40	27.94 - 27.90	0.01	0.03	0.04
10	9.07 - 9.08	16.54 - 16.53	32.37 - 32.36	0.01	0.01	0.01
11	16.43 - 16.43	9.59 - 9.58	12.14 - 12.02	0.00	0.01	0.12
12	18.88 - 18.92	1.60 - 1.55	51.59 - 51.58	0.03	0.05	0.01
13	16.66 - 16.70	-8.50 - -8.47	23.02 - 22.98	0.04	0.03	0.04
14	9.63 - 9.64	-15.48 - -15.47	40.29 - 40.23	0.02	0.01	0.06
15	0.42 - 0.41	-18.17 - -18.19	8.99 - 8.92	0.01	0.02	0.07
16	-8.51 - -8.54	-15.11 - -15.10	31.51 - 31.53	0.03	0.02	0.02
17	-15.62 - -15.61	-8.59 - -8.59	14.01 - 13.87	0.01	0.00	0.15
18	-32.69 - -32.77	0.61 - 0.61	43.40 - 43.42	0.08	0.00	0.02
19	-26.63 - -26.73	17.14 - 17.14	52.47 - 52.54	0.10	0.00	0.07
20	-15.83 - -15.89	28.22 - 28.20	37.86 - 37.90	0.06	0.03	0.04
21	0.66 - 0.60	33.35 - 33.32	5.09 - 4.98	0.06	0.03	0.11
22	16.89 - 16.92	28.96 - 28.93	46.54 - 46.47	0.03	0.03	0.06
23	28.52 - 28.67	16.86 - 16.85	17.58 - 17.47	0.15	0.01	0.10
24	33.14 - 33.22	1.02 - 1.05	34.22 - 34.18	0.08	0.03	0.04
25	28.86 - 28.88	-16.41 - -16.40	6.77 - 6.64	0.02	0.01	0.14
26	16.83 - 16.87	-28.17 - -28.14	20.97 - 20.82	0.05	0.03	0.15
27	0.26 - 0.29	-32.61 - -32.60	50.45 - 50.45	0.03	0.01	0.00
28	-16.31 - -16.33	-28.09 - -28.12	10.37 - 10.19	0.02	0.03	0.18
29	-28.29 - -28.33	-15.09 - -15.13	33.28 - 33.23	0.03	0.04	0.05
30	-49.94 - -50.03	0.20 - 0.27	38.23 - 38.20	0.09	0.07	0.02
31	-42.73 - -42.79	26.29 - 26.42	30.31 - 30.16	0.06	0.13	0.15
32	-24.36 - -24.41	43.83 - 43.83	8.52 - 8.32	0.05	0.00	0.20
33	0.04 - 0.01	49.48 - 49.46	49.37 - 49.47	0.03	0.02	0.10
34	25.25 - 25.31	43.64 - 43.65	36.06 - 36.06	0.06	0.01	0.00
35	49.84 - 49.95	-0.34 - -0.32	24.98 - 24.92	0.11	0.02	0.06
36	43.75 - 43.83	-23.82 - -23.81	45.80 - 45.75	0.09	0.00	0.05
37	25.28 - 25.34	-42.68 - -42.71	42.07 - 42.03	0.06	0.03	0.04
38	-0.02 - 0.02	-49.58 - -49.59	47.70 - 47.82	0.04	0.01	0.12
39	-24.93 - -24.92	-42.05 - -42.03	25.88 - 25.87	0.01	0.02	0.01
40	-42.97 - -43.03	-24.08 - -24.12	19.29 - 19.16	0.06	0.04	0.12
			Average error	0.04	0.02	0.07
			Standard deviation	0.05	0.03	0.09

3.5 가상영상에 의한 성능평가

3.5.1 가상영상의 구현

Willert 와 Gharib 등[35]은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV 가상영상(32X32 pixel)의 상관영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8 pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8 pixel)을 제시했으며, Okamoto 등[36]은 젯트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준영상의 구성과 PIV 표준 계획(PIV-STD3D)을 제시했다.

본 연구에서 유전알고리듬의 성능을 평가하기 위해 Okamoto 등이 제시한 3차원 제트 유동에 대한 가상영상데이터를 도입하여 가상이미지(virtual image)를 구축한 후 이에 대한 이미지를 이용하여 실제 계측을 실시함으로써 계측알고리듬의 성능을 평가하였다.

본 연구에서 생성된 이미지의 해상도는 512 x 512 pixel이며, 각 pixel은 256계조(gray level, 8bit)이다. 각 입자에 대한 밝기는 입자의 중심을 기준으로 하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$I(X, Y) = I_0 \, \mathrm{Exp}\left(\frac{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}{-(d_p/2)^2} \right) \tag{3.10}$$

$$I_0 = 240 \, \mathrm{Exp}\left(- \frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_l^2} \right)$$

입자의 크기는 직경 0.3mm(약 3 pixels)을 기준으로 하였으며, 조명의 직경은 60mm를 적용하였으며, 입자의 개수는 도 등[22]의 연구를 기준으로 하여 50에서 2000개를 사용하였다. 먼저 카메라의 정보를 얻기 위해 모든 카메라에 대한 교정작업을 해야 하며, Fig. 3.3의 교정기(약 X, Y, Z가 -50 50, -50 50, 0 50 mm)를 사용하여 가상 및 실제에 대한 교정작업을 하였다. Table 3.3은 교정기의 절대 좌표

값을 나타내고 있다.

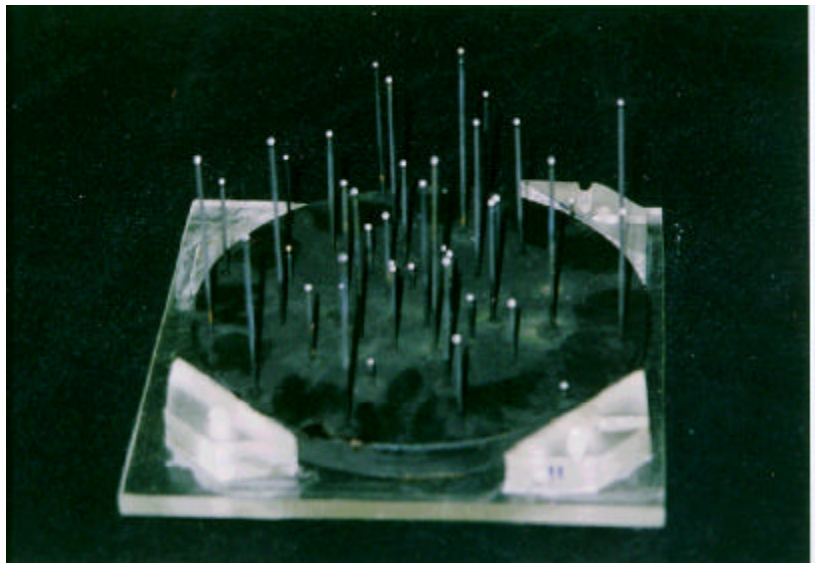


Fig. 3.3 Picture of calibrator for the generation of a set of virtual image

Table 3.3 Absolute coordinate of the calibrator used for the generation of virtual images[mm]

No.	X	Y	Z
1	0.2000	-7.7516	6.5188
2	7.3386	-3.8389	13.0829
3	7.1826	4.8918	17.0283
4	0.5809	8.7543	39.7021
5	-6.5406	4.1629	15.9084
6	-6.3076	-3.2634	24.5248
7	0.8383	-17.7463	29.0704
8	10.2142	-15.4834	21.4611
9	16.9448	-8.9227	43.1246
10	19.4009	0.6626	27.9001
11	16.5258	9.0808	32.3592
12	9.5821	16.4280	12.0234
13	1.5498	18.9168	51.5761
14	-8.4680	16.7006	22.9841
15	-15.4715	9.6417	40.2301
16	-18.1874	0.4146	8.9176
17	-15.0978	-8.5400	31.5309
18	-8.5938	-15.6116	13.8650
19	0.6080	-32.7680	43.4187
20	17.1421	-26.7340	52.5382
21	28.1973	-15.8846	37.8964
22	33.3205	0.5987	4.9782
23	28.9298	16.9216	46.4743
24	16.8530	28.6673	17.4736
25	1.0476	33.2205	34.1831
26	-16.4029	28.8808	6.6368
27	-28.1422	16.8719	20.8206
28	-32.6023	0.2917	50.4479
29	-28.1175	-16.3255	10.1926
30	-15.1312	-28.3268	33.2271
31	0.2715	-50.0334	38.2043
32	26.4238	-42.7926	30.1636
33	43.8331	-24.4106	8.3207
34	49.4580	0.0109	49.4652
35	43.6475	25.3076	36.0622
36	25.5517	44.0473	3.8494
37	-0.3152	49.9450	24.9162
38	-23.8146	43.8323	45.7507
39	-42.7111	25.3380	42.0268
40	-49.5878	0.0228	47.8234
41	-42.0264	-24.9213	25.8710
42	-24.1197	-43.0299	19.1620

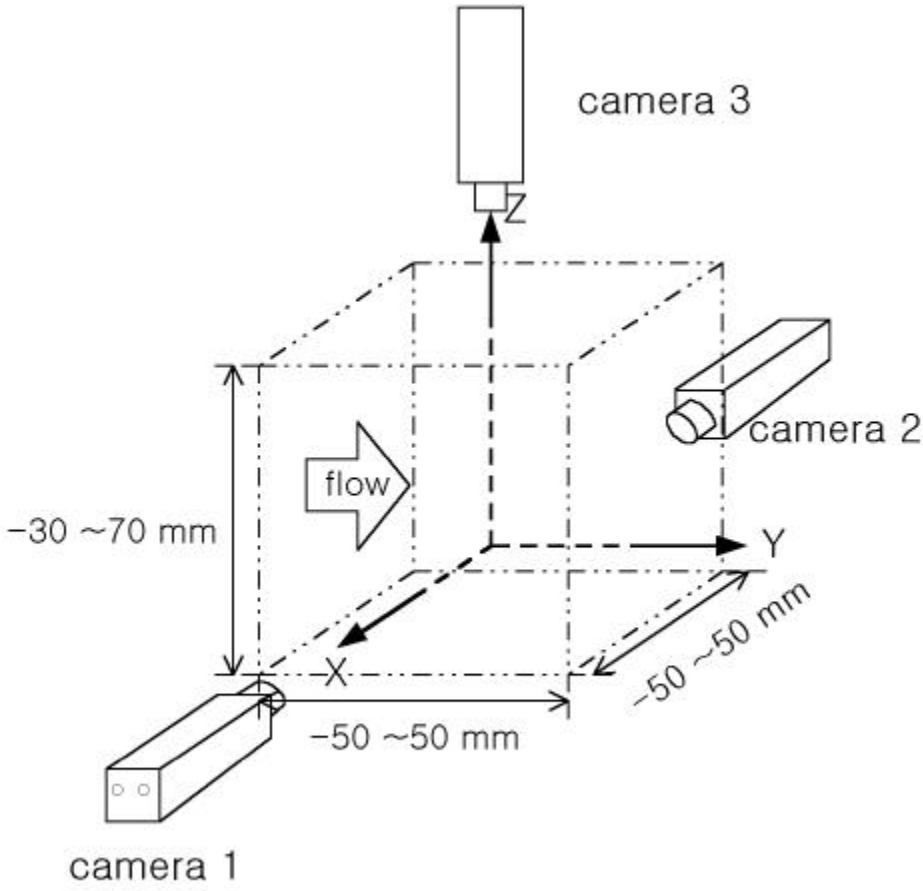


Fig. 3.4 Camera position for the acquisition of images

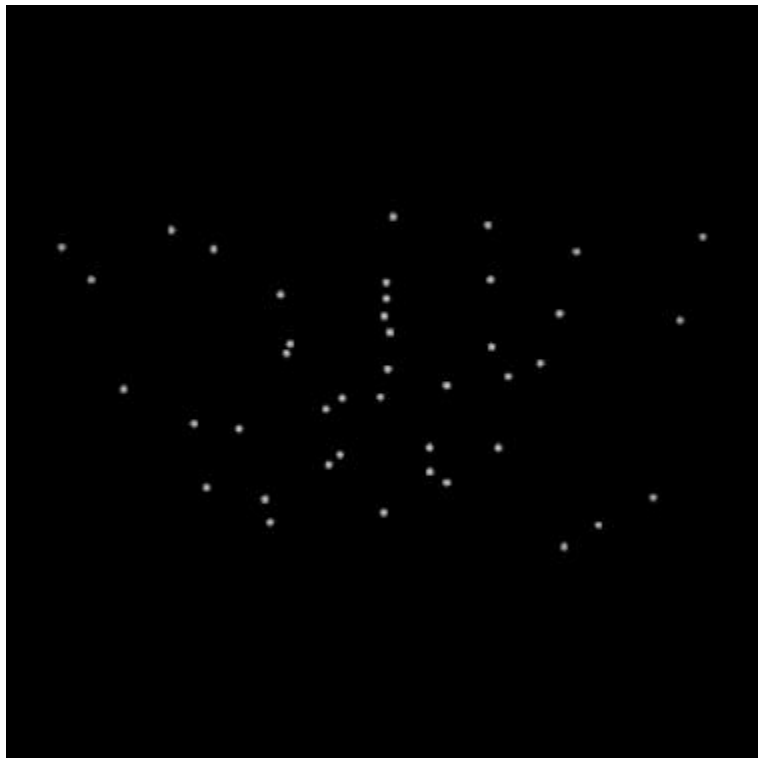


Fig. 3.5 Virtual image of the calibrator viewed by camera 1

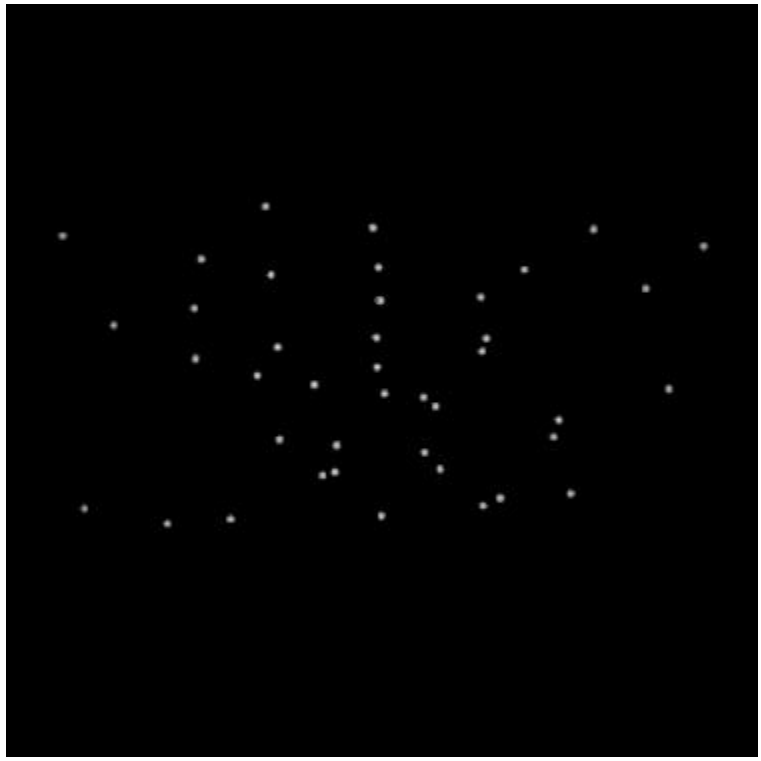


Fig. 3.6 Virtual image of the calibrator viewed by camera 2

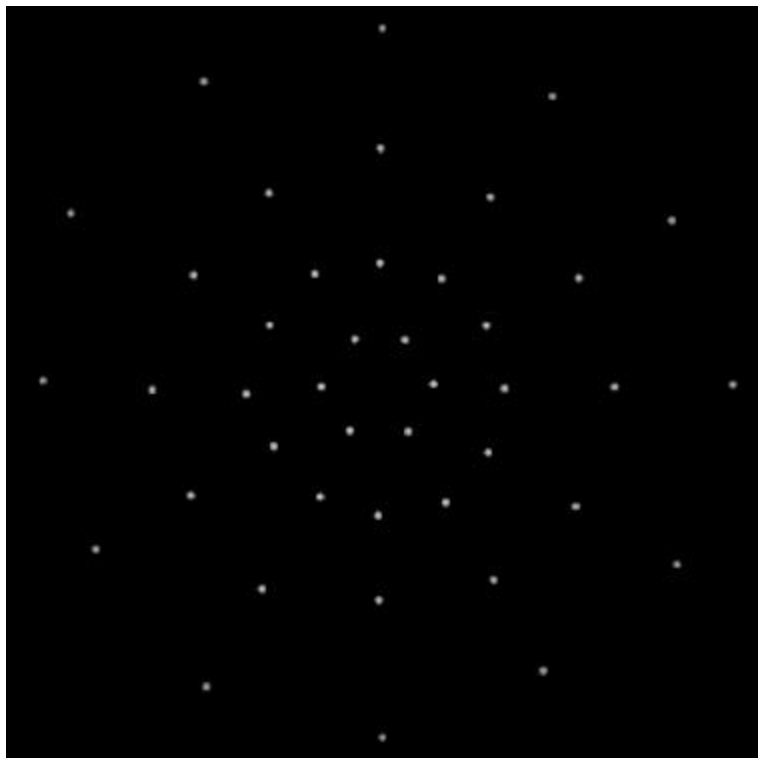


Fig. 3.7 Virtual image of the calibrator viewed by camera 3

Fig. 3.4는 가상영상의 구현을 위한 카메라의 위치를 나타내고 있다. 각각의 카메라는 유동 방향과 직각인 방향에 두어졌으며, 관측영역은 교정기가 가상영상의 중심에 오도록 위치해 있다. Fig. 3.5, Fig. 3.6 및 Fig. 3.7은 생성된 교정기에 대한 가상영상을 보여주고 있다.

3차원 공간 및 속도를 계측하기 위해서 먼저 카메라의 정보를 구하는 교정작업을 해야한다. 본 연구에서는 Doh 등[23]의 연구를 기준으로 계산상의 2차원 좌표를 이용한 이상적인 교정작업(IH)과 임계값을 이용하여 도심을 구한 실험에 적용되는 교정작업(RH)으로 분리하였다.

Table 3.4는 11개의 표정요소에 대하여 IH, RH작업과정을 거친 가상영상에 대한 카메라 1과 3에 대한 결과 및 카메라 2와 3의 공선의 조건으로부터 구한 공간상의 결과를 보여 주고 있고, Table 3.5는 실제 교정기를 사용한 교정작업 결과를 보여주고 있다.

카메라 1과 카메라 3에 대해서는 오차량이 상대적으로 큰데 이것은 실험시 카메라의 초점이 흐린 것이 그 이유로 생각되며, 3차원 계측에서의 카메라의 초점 정도가 계측 결과에 상당한 영향을 미침을 알 수 있었다.

Table 3.4 Camera calibration by the use of a virtual image of the calibrator

Parameter		IH (11 parameter)	RH (11 parameter)
X_0(mm)		0.0000	0.0105
Y_0(mm)		0.0000	0.0073
Z_0(mm)		499.9997	500.0433
α(°)		0.0000	-0.0082
β(°)		-0.0000	0.0095
χ(°)		0.0000	-0.0001
c(pixel)		-2199.9992	-2200.2813
Average Error	X	0.00	0.00
	Y	0.00	0.02
	Z	0.00	0.01
Standard deviation	X	0.00	0.00
	Y	0.00	0.03
	Z	0.00	0.01

Table 3.5 Camera calibration by the use of actual image of the calibrator

Parameter		(11 parameter)		
		Camera 1	Camera 2	Camera 3
X_0		298.2380	-294.3097	21.2176
Y_0		590.6079	-636.8735	1.7067
Z_0		19.6709	28.7552	715.6505
α		83.8680	-98.9806	9.4330
β		-0.5757	0.1542	-1.3937
κ		27.6702	24.3260	-784.2893
c		-2922.2584	3310.1608	2989.1971
		Camera 1, 3	Camera 2, 3	
Average error	X	0.05	0.05	
	Y	0.09	0.07	
	Z	0.34	0.04	
Standard deviation	X	0.07	0.06	
	Y	0.12	0.11	
	Z	1.27	0.05	

3.5.2 제트유동의 가상영상

본 연구에서는 계측알고리듬의 성능평가를 위해 Visualization Society of Japan(http://www.vsj.or.jp/piv)에서 제트유동에 대하여 Okamoto 등[36]이 제시한 데이터를 사용하여 가상영상을 구현하였는데 사용된 데이터들은 교정기의 영역을 기준으로 하여 (-50 50, -50 50, -30 70)mm로 확대 및 이동하였다. 입자들은 임의적으로 50에서 2000개까지 발생시켰으며 입자의 최대 이동거리를 10 pixel보다 작도록 설정하였다.

PTV에 의한 3차원 속도 계측방법에 있어서 입자의 중심에 의한 영향이 상당히 크므로 본 연구에서도 도 등의 연구에서 사용했던 방법대로 계산상의 2차원 좌표를 이용한 이상적인 입자중심(IK)과 임계값을 이용하여 도심을 구한 실험에 적용되는 입자중심(RK)으로 분류하여 IHIK, 및 RHRK에 대해 알고리듬을 적용하였다.

Fig. 3.8은 CFD의 계산결과로부터 임의적으로 발생된 3차원 속도벡터들을 보여주고 있다. Fig. 3.9는 이들 이 벡터들의 시점과 종점을 기준으로 작성한 가상영상을 나타낸다. 이들 영상에 대하여 본 연구에서 구축한 GA-3D-PTV 계측알고리듬을 적용하여 3차원 속도벡터를 구하였다. Fig. 3.10 과 Fig. 3.11은 IHIK 및 RHRK에 대해 유전알고리듬으로 계산한 속도벡터를 보여주고 있는데 그림에서 볼 수 있듯이 IHIK의 경우 임의적으로 발생된 속도 분포와 계산에 의한 속도 분포가 거의 유사함을 알 수 있으나, RHRK의 경우 결과에 에러벡터가 포함되어 있다. 이러한 에러벡터의 정도를 판단하기 위해 회복율을 다음과 같이 정의 하였다.

$$R_r = 100\frac{V_r}{V_g} \tag{3.11}$$

R_r : 회복율(%)

V_g : 임의적으로 생성된 벡터

V_r : 찾은 벡터중 오차가 0.1mm보다 작은 벡터

Fig. 3.12는 3차원성이 강한 Jet Flow에의 가상영상에 대한 본 알고리듬의 계측결과를 보여주고 있다. GA에 의한 3차원 PTV방법이 복잡유동장의 난류유동구조 해명을 위해서는 일회계측으로 많은 속도벡터들이 얻어져야 하는데 이와 같은 결과는 본 연구에서 구축한 계측법이 난류유동구조 해명에 도움을 줄 것으로 생각할 수 있다.

여기서 IK에 비해 RK의 회복율이 급격히 떨어지는 이유는 3차원 공간이 카메라의 2차원 평면으로 변환될 때 입자들이 서로 겹침으로서 사라지거나 입자의 중심값 자체에 오차를 가지기 때문이다. Fig. 3.13는 이러한 입자들의 겹침에 의해 사라진 입자를 퍼센트로 표시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 입자의 개수가 2000개일때는 약 15%, 300개정도의 입자가 사라지게 된다. 또 3차원 위치를 결정하기 위해서는 2대 이상의 카메라가 필요하게 되므로 이러한 오차는 거의 2배 이상으로 커지게 된다. 이러한 점을 고려할 때 유전적 알고리듬에 의한 계측법은 꽤 높은 회복율을 보이고 있음을 알 수 있다. 이들 결과들로부터 유전적 알고리듬으로 3차원 속도벡터를 위한 유동장의 최적의 투입 입자수는 약 1000개에서 1500개 사이에 있음을 알 수 있었다.

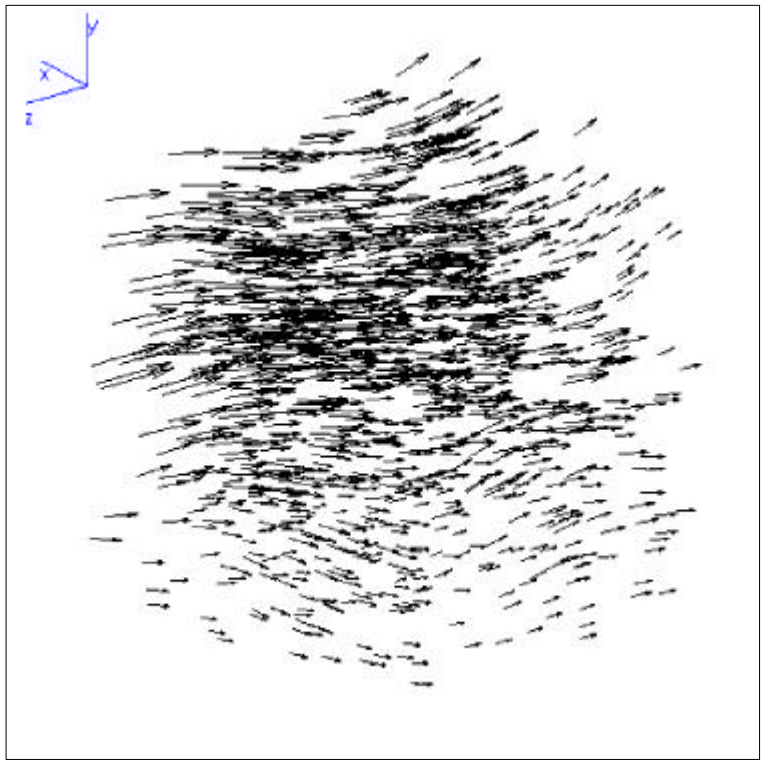
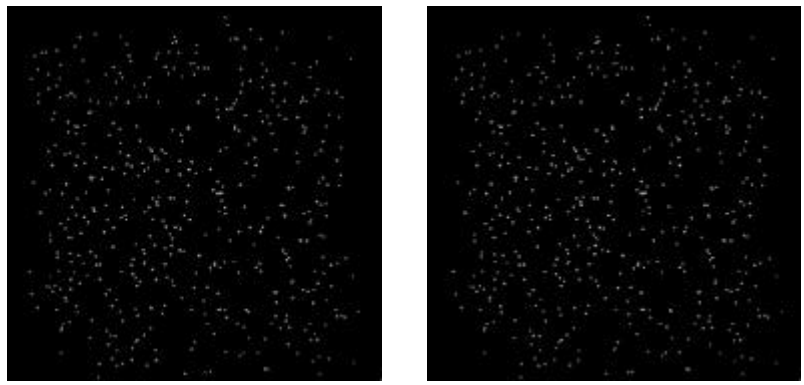


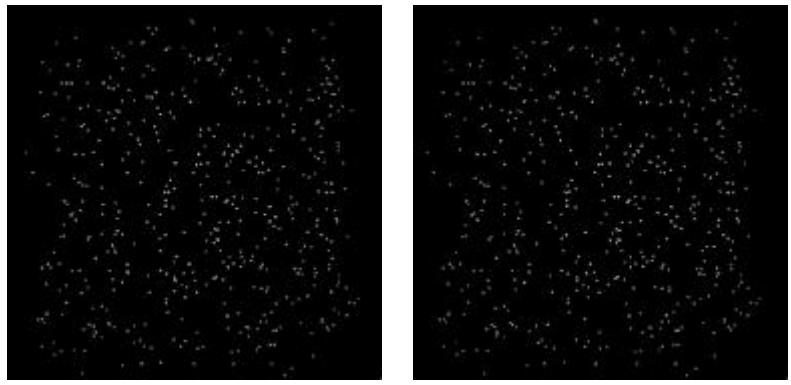
Fig. 3.8 Velocity distribution made by random using the jet data(LES)

(a) Camera 1



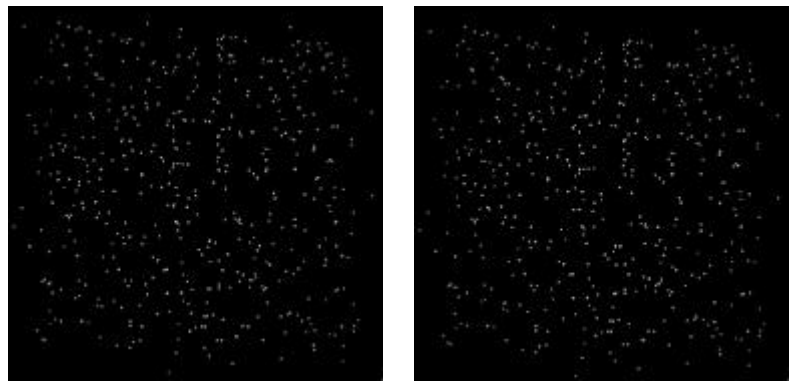
start end

(b) Camera 2



start end

(c) Camera 3



start end

Fig. 3.9 Virtual images viewed by cameras on an impinging jet

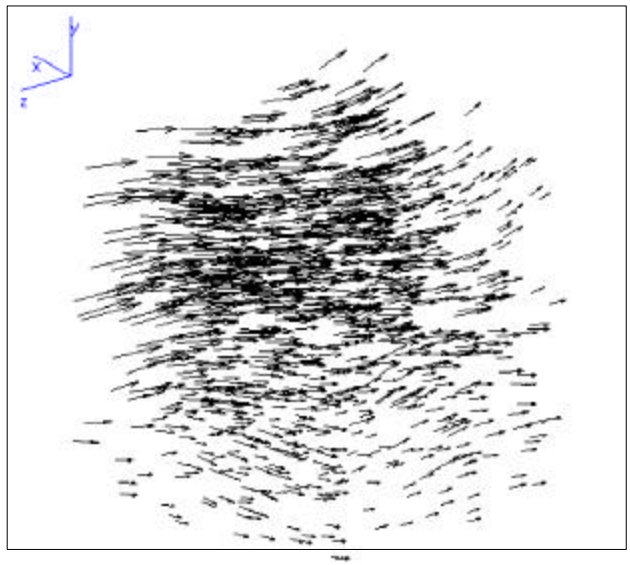


Fig. 3.10 Recovered vectors(IHIK case)

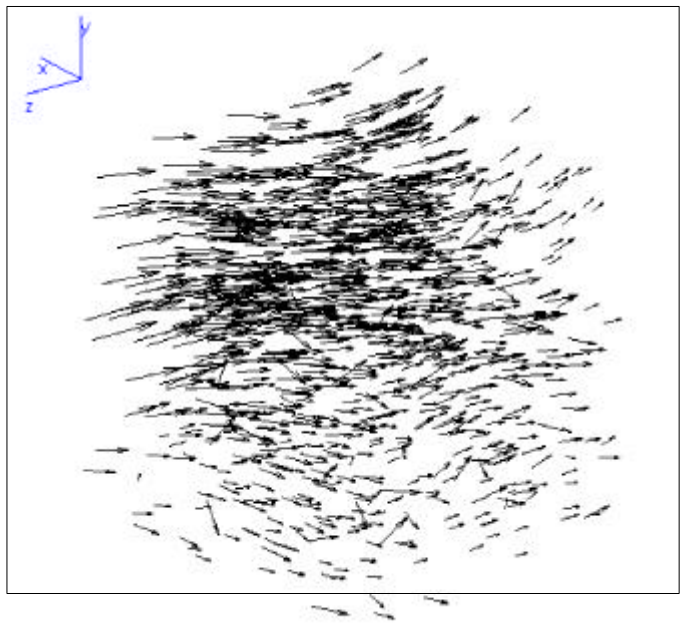


Fig. 3.11 Recovered vectors(RHRK case)

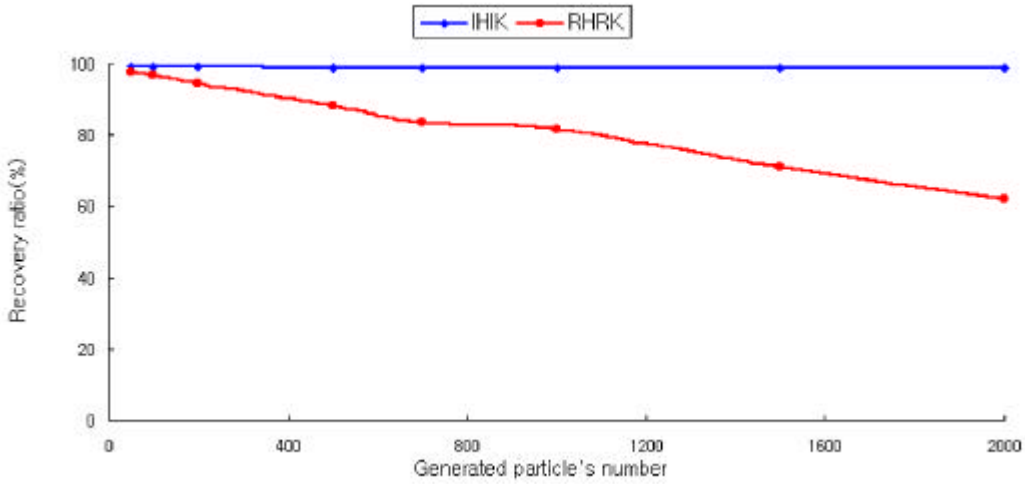


Fig. 3.12 Recovery ratio using GA-3D-PTV(Jet flow)

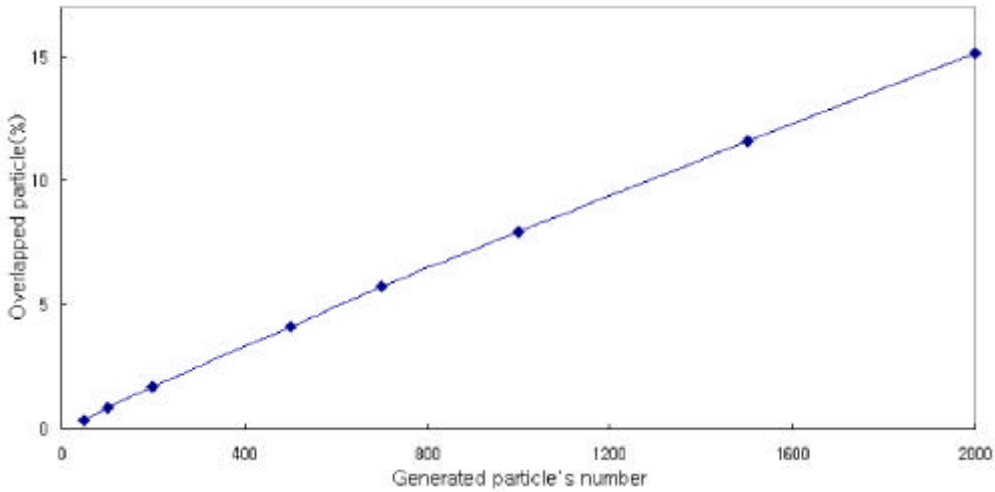


Fig. 3.13 Overlapping rate of particles in the virtual images

제 4장 원주 근접후류 계측

4.1 계측 시스템

Fig. 4.1은 직경 D=30mm인 원주 근접후류에 대하여 본 연구에서 개발한 유전적 알고리듬 기반의 3차원 PTV로 계측하기 위한 시스템을 나타낸다.

계측 시스템의 구성은 3대의 CCD카메라(768 × 494 pixels), 이미지그래버(image grabber : 512 × 512 pixels, 256 gray levels), 레이저(500mW), AOM장치, 3대의 비디오, 그리고 32bit 호스트 컴퓨터로 되어있다.

AOM(Acousto-Optical Modulator)은 계측 영역내의 미소입자들을 탐색하는데 있어 검사 영역의 시간해상도를 높이는데 사용한다. AOM의 펄스신호는 CCD카메라에 의해서 동기 되며, 이미지의 1프레임에 해당하는 1/30초의 짝수(1/60)와 홀수(1/60)필드 이미지 각각에 설정한 시간간격동안 레이져 광원의 노출시간을 제어한다. 3대의 카메라는 이미지그래버(Ditect 64)로 바로 보내어져 아날로그에서 디지털로 전환되어 256gray levels(512 × 512)로 저장된다. 이미지 그래버는 64 M의 RAM이 장착되어 있으며, 카메라에 의해 동기 되어 R, G, B 이미지를 동시에 실시간으로 64장씩 저장 할 수 있다. 저장된 이미지로부터 프레임을 필드로 분리하고, 배경을 제거하는 과정을 거치면, 이미지는 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 이미지는 임계값에 의한 이치화 한 다음 윤곽선추적(boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 (2.11)식의 면적 모멘트 공식에 의해 입자의 중심을 결정한다.

결정된 입자의 중심으로부터 수행된 카메라의 교정작업 결과를 이용하여 유전알고리즘을 적용함으로써 최종적인 3차원 순시속도벡터를 획득한다.

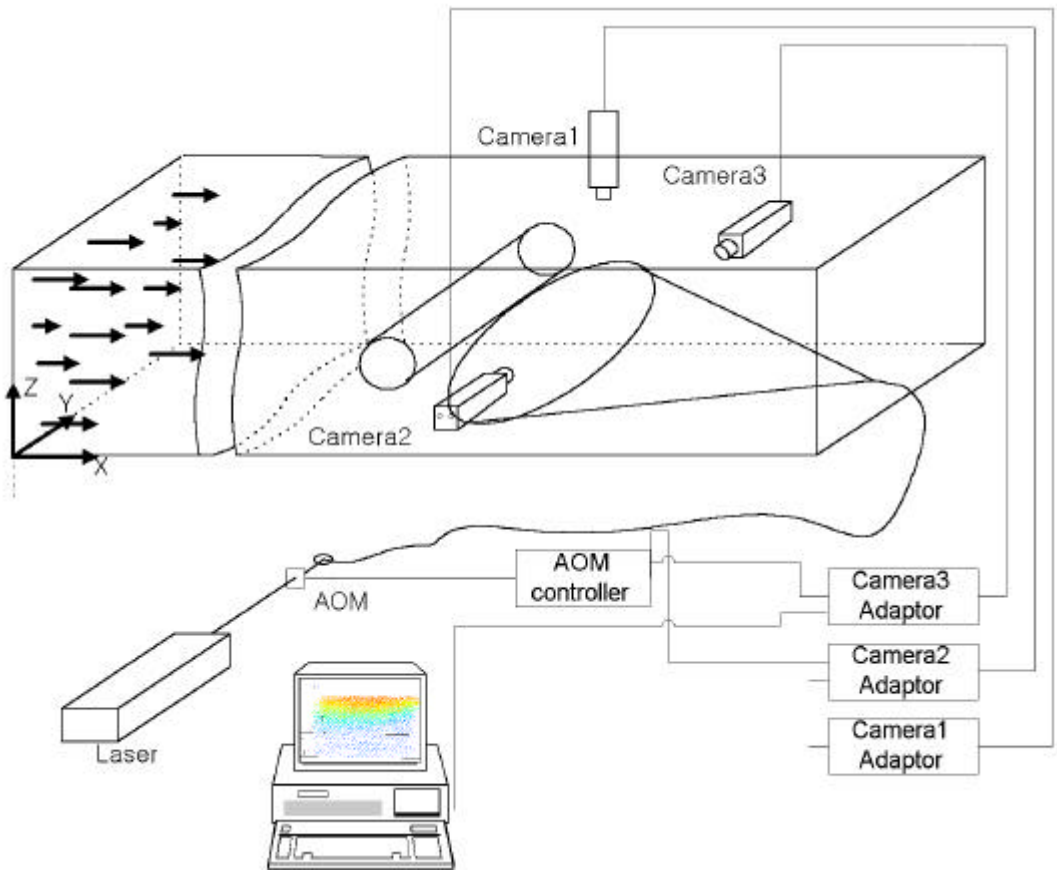


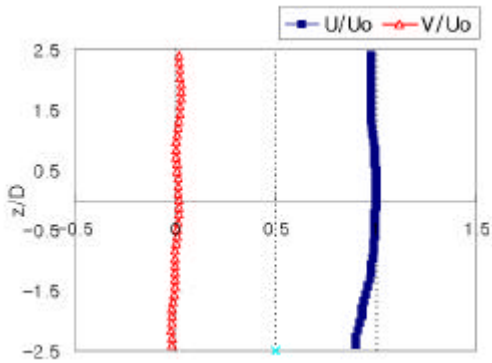
Fig. 4.1 Experimental set up for 3D-PTV measurement

4.2 계측방법 및 실험조건

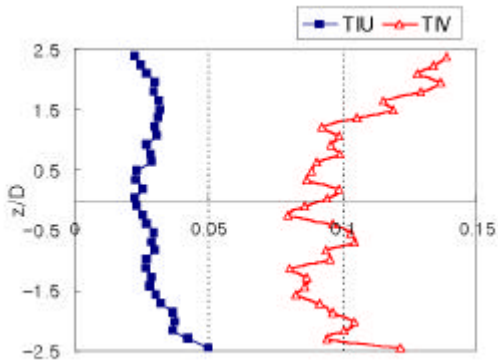
본 연구에서 사용된 수조는 개로 수조로 250×75×2400mm^{3}이며 유동장의 입구로부터 1020mm 지점에 실린더를 설치하여 유동이 충분히 발달할 수 있도록 하였다. 카메라는 물과 공기와 아크릴의 굴절에 의한 오차를 최소화할 수 있도록 유동장의 좌, 우 및 상방향에 수직이 되도록 설치하고, 카메라의 교정작업을 수행하였다. 카메라의 교정기는 전술한 바와 같이 Fig. 2.3의 교정기를 원주 후방에 0.33D 3.7D사이에 설치하였다. 계측영역(X, Y, Z)은 실린더 중심으로부터 하류방향의 2.500D를 기준으로 X(-40 40mm), Y(-50 50mm), Z(0 70mm)로 하였다.

카메라의 교정작업을 마친 후 추적입자(나일론 12, 비중 1.02)를 유동장에 투입한 후 Ar-ion 레이져 (500mW)의 광원을 하류측에 설치하여 관측영역 전체에 걸쳐 조사하였다. 본 연구에서 실린더의 직경 D는 30mm이며, 관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 Re = 1050이였다.

입구조건은 Fig.4.2의 원형실린더 전방 y/D=-5D인 지점에 대해서 평균속도 프로파일,난류강도,레이놀즈응력, 난류운동에너지에 대한 계산 결과를 보여주고 있다.

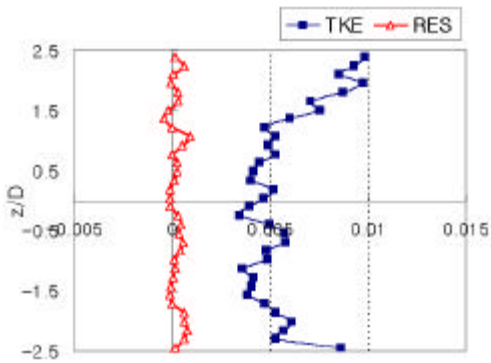


(a) Mean velocity profile



(b) Turbulence intensity(U and V)

($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$, $T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)



(c) Turbulence kinetic energy and reynolds stress

($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$, $RES = - \overline{u'v'} / U_0^2$)

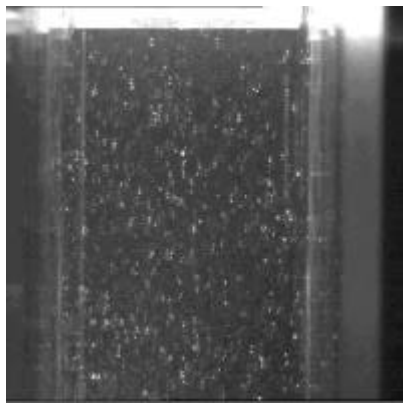
Fig. 4.2 Inlet flow condition at y/D = -5

제 5 장 계측 결과의 고찰

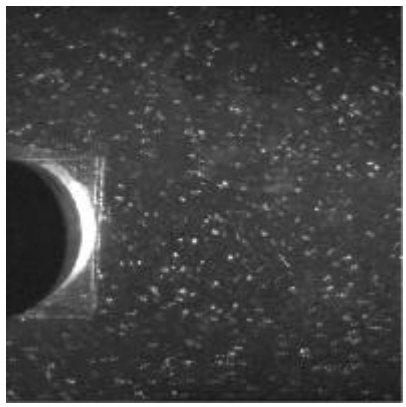
5.1 3차원 평균 및 순시 속도장

Fig. 5.1은 Fig. 4.1과 같이 설치된 카메라들로부터 이미지그래버에 받아들여진 이미지를 나타내고 있다. Fig. 5.2는 이들 실험이미지의 두 시각 분을 이용하여 본 연구에서 구축한 계측법으로 얻어낸 3차원 속도벡터들에 대해 연속의 식을 이용하여 에러벡터를 제거한 3차원 속도 벡터를 보여주고 있으며, 평균적으로 프레임당(1 Frame으로 1회의 계측) 약 1100개의 속도 벡터를 얻을 수 있었다. 얻어진 벡터로부터 Gaussian Window 보간방법을 사용하여 평균 벡터 및 순시벡터의 보간을 행했다. Fig. 5.3은 3차원 순시속도벡터들의 변화이력을 옆면에서 보고 있는 결과를 나타내고 있다. 시간의 변화에 따라서 Karman 와의 구조가 점점 쇠약해져 가고 있음이 보인다. 이러한 결과들로부터 Karman 와의 주기를 구할 수 있다는 점은 공학적 의의가 깊다고 할 수 있다.

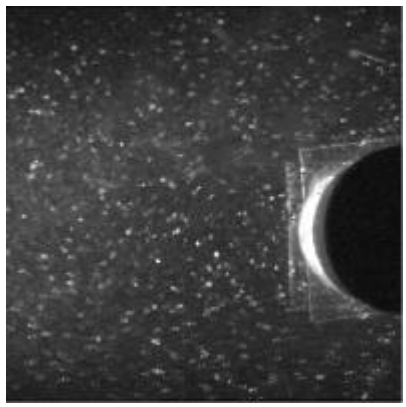
Fig. 5.4 와 Fig. 5.5는 어느 한 순간에 있어서 여러 xy단면, xz단면상의 속도장을 나타내고 있다. 이들 결과들로부터는 Brede 등[37]이 보고한 레이놀즈수가 300이상에서 발생하는 B 모드의 와구조(Fig. 5.6 참조)가 발생하고 있음을 추론할 수 있다.



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 5.1 Raw images viewed by each camera

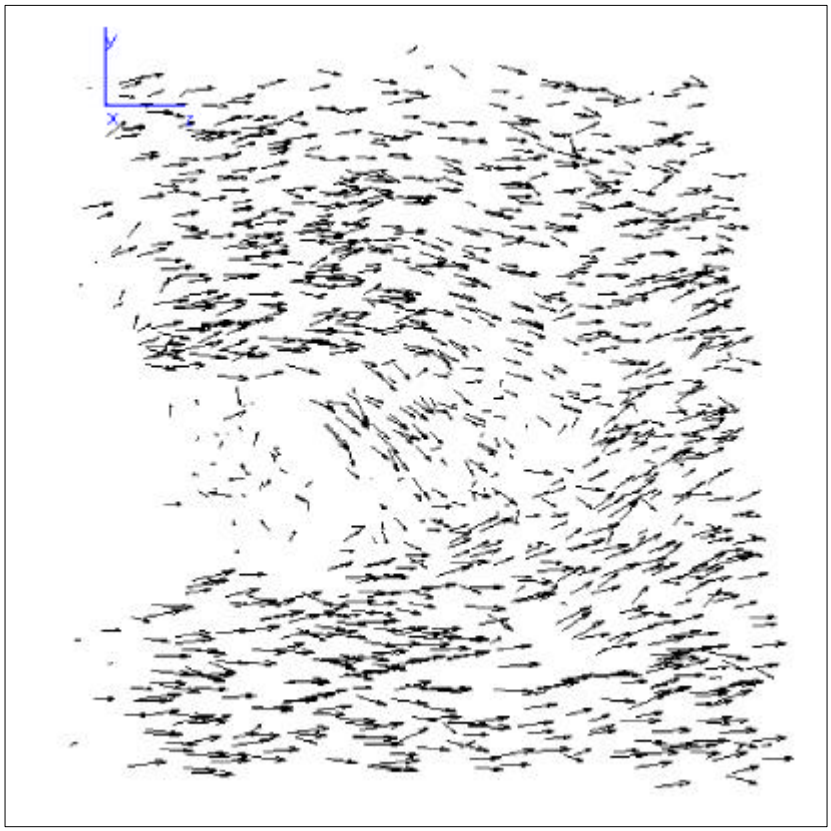
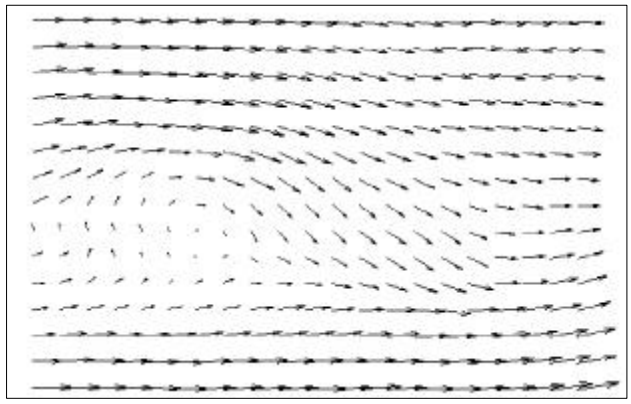
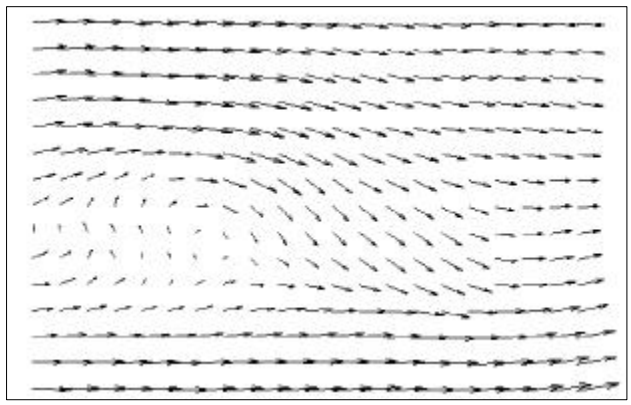


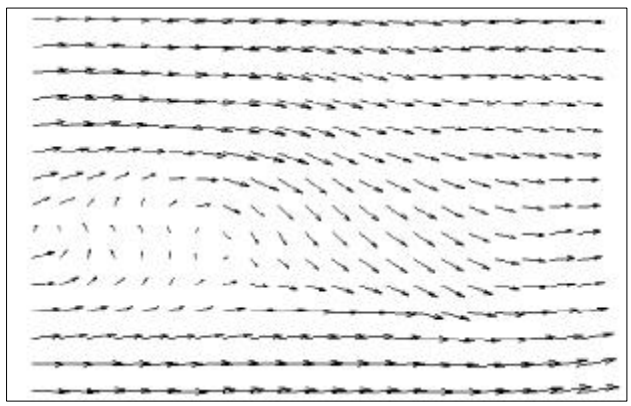
Fig. 5.2 Instantaneous 3D velocity vectors obtained by GA-3D-PTV



(a) t=to

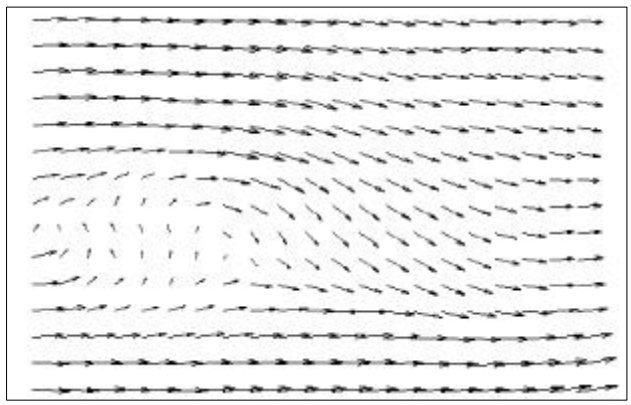


(b) t=to + 1/30

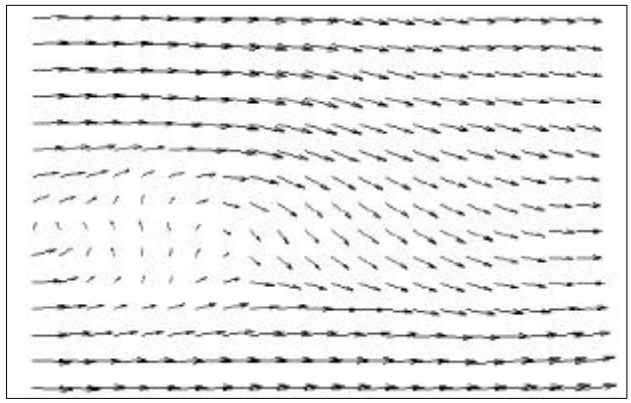


(c) t=to + 2/30

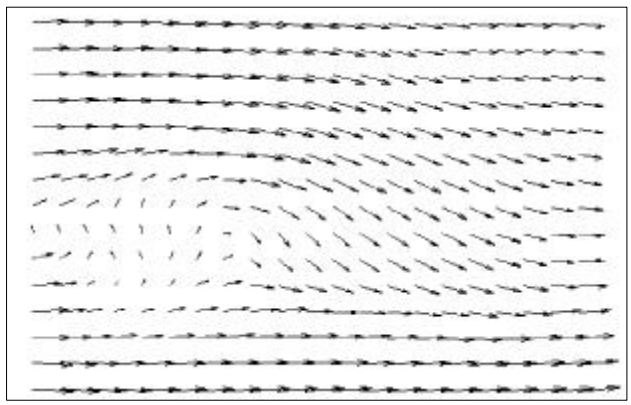
Fig. 5.3 Temporal evolution of velocity field (continued)



(d) t=to + 3/30

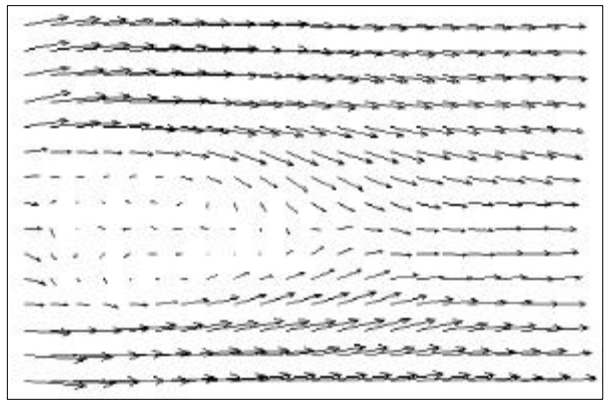


(e) t=to + 4/30

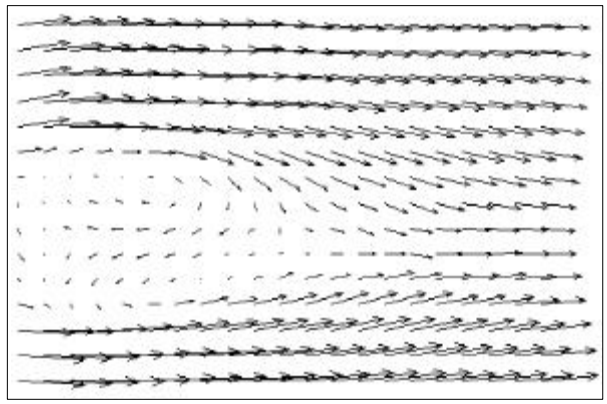


(f) t=to + 5/30

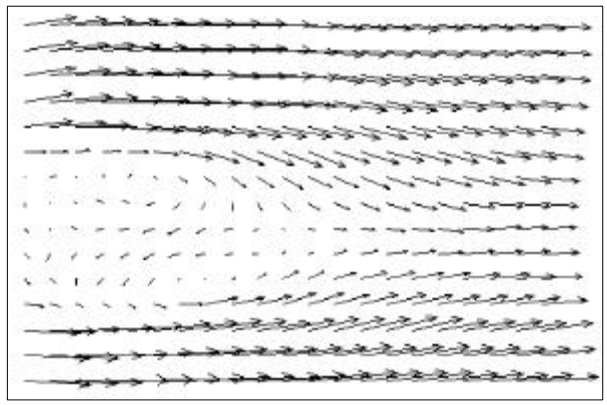
Fig. 5.3 Temporal evolution of velocity field



(a) Z = 10mm

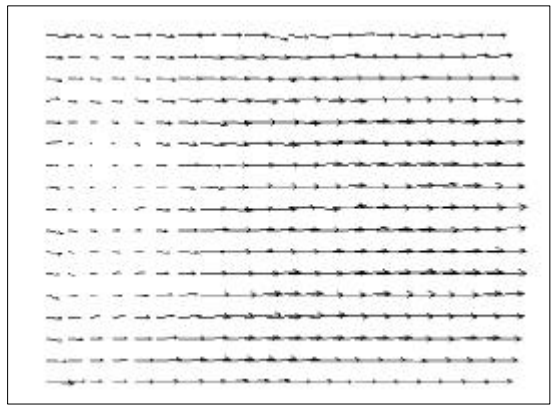


(b) Z = 35mm

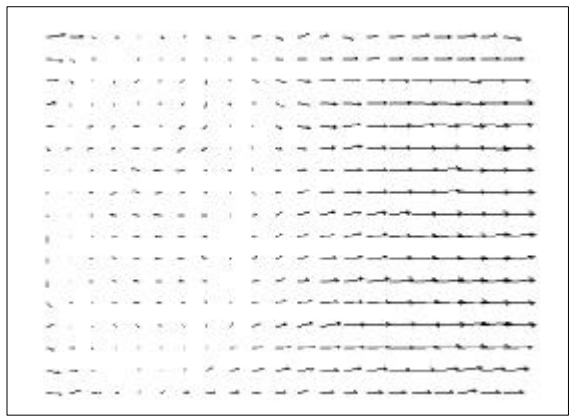


(c) Z = 45 mm

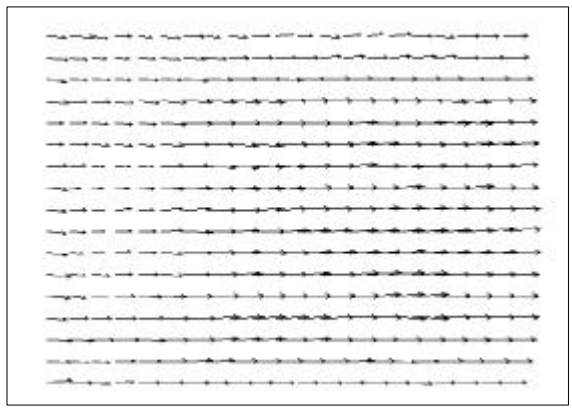
Fig. 5.4 Instantaneous velocity field of xy-plane



(a) Y = 10 mm



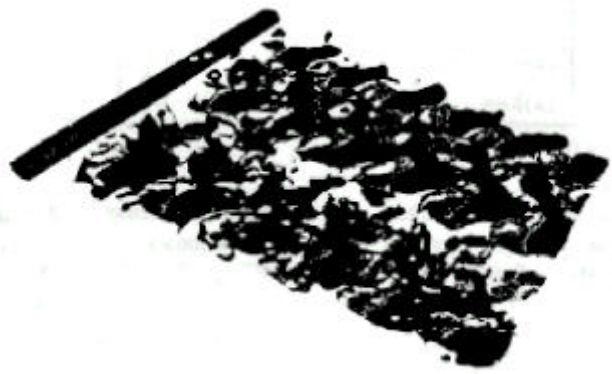
(b) Y = 35 mm



(c) Y = 45 mm

Fig. 5.5 Instantaneous velocity field of xz-plane

Fig. 5.7은 약 1,500,000개의 3차원 순시속도벡터를 Gaussian Window 보간방법을 이용하여 보간한 3차원 평균 벡터를 보여주고 있다. 이와 같은 평균속도장과 전술의 순시속도장을 이용하여 변동속도장을 구해낼 수 있다.



(a) A-mode

(b) B-mode

Fig. 5.6 Vortices' structures

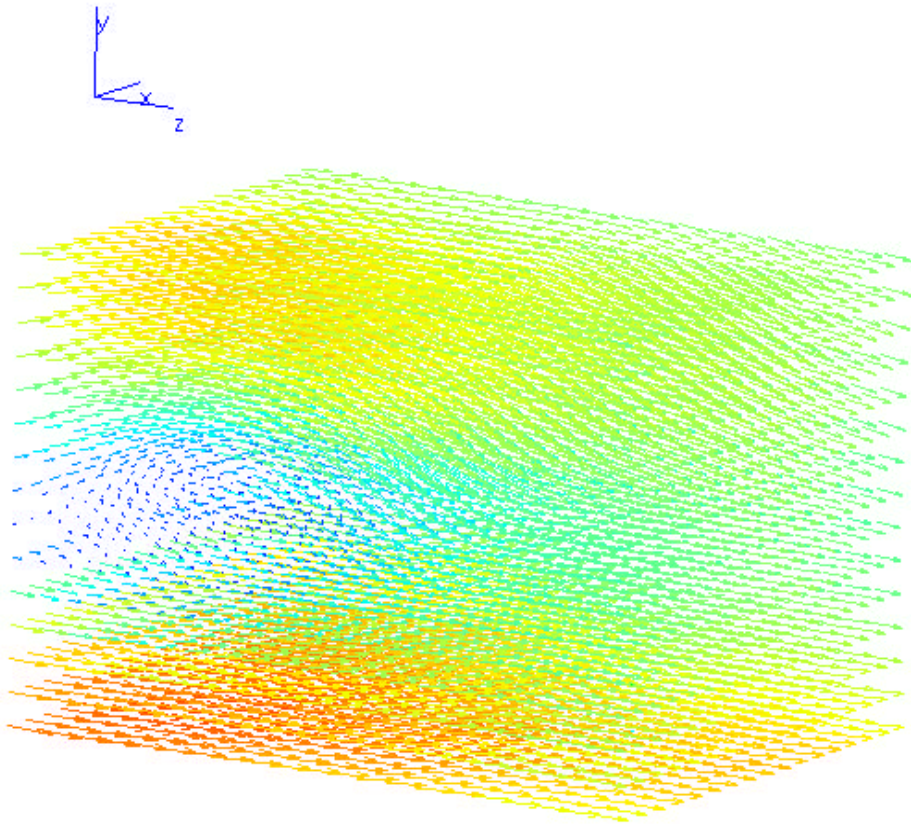


Fig. 5.7 Mean velocity field

5.2 각 단면에서의 난류강도 분포

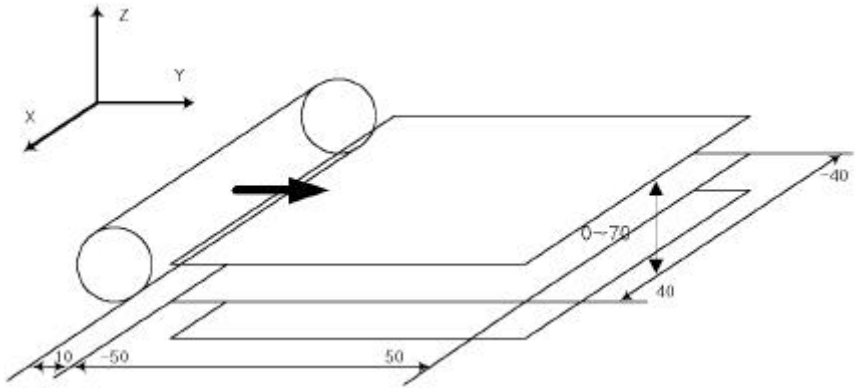
Fig. 5.8 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 난류강도(u성분)의 분포를 보이고 있다. 그림에서 Y=2.500D인 지점은 원주 중심으로부터 원주 직경을 D라 할 때 2.500D의 위치를 말하며 X=0.000D, Z=0.000D인 지점은 원주의 중심선상에 있음을 의미한다.

Fig. 5.8 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z 방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류강도분포(u성분)를 보이고 있다. 단면이 Z=-0.167D와 Z=0.167D 사이에 Y=2.500D에서 최대의 난류강도분포가 존재함을 알 수 있는데 이는 원주에서 떨어져 나온 와가 이 부분에서 격렬하게 Y방향으로 운동량교환을 일으키고 있음을 시사한다. 또한 X-Y의 중앙단면을 기준으로 상하 대칭적인 난류강도의 분포를 보이고 있다.

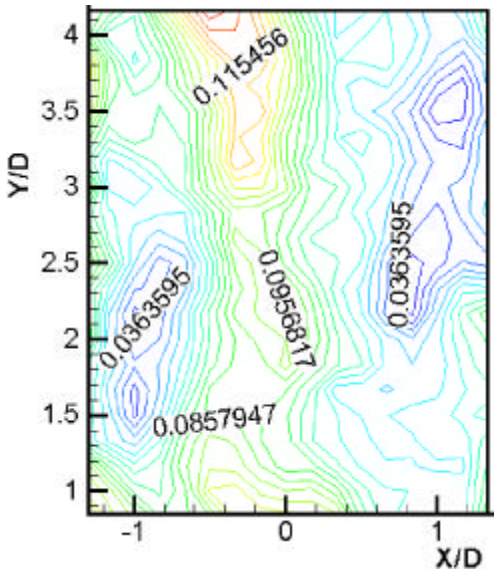
Fig. 5.9 는 그림에서 보이는 바와 같이 Y-Z단면의 난류강도(u성분)분포를 보이고있다. 원주의 중심선상인 X=0.000D에서의 난류강도의 최대치는 나타나지 않고 대신에 X=-0.333D의 부근에서 최대치가 나타나있다. 위의 그림들과 종합하여 볼 때 Y=2.500D, Z=0.000D(원주중심의 위치), X=-0.333D부근에서 와의 충돌이 격렬하게 발생하고 있음을 추론할 수 있다. 이와 같은 유동구조는 다른 계측기법으로 파악될 수 없는 정량적 정보이다. 대체적으로 Y=2.500D의 위치에서 X축을 따라서 유사한 값들을 유지하고 있는 것으로 보아 B 모드의 형상이 나타나고 있다.

Fig. 5.10은 X-Z plane이 원주 근접 후류측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류강도분포(u성분)를 보이고 있다. Z=-0.167D인 부근에서 전단면에 걸쳐 크게 나타나는 것은 원주의 중앙부에서 vortex trail같은 구조가 하류쪽으로 늘어 떨어져 가고 있음이 예상되며 이 또한 매우 불안정한 상태로 떨어져 감이 보인다. Y=2.500D의 위치에서 강한 난류강도가 존재함이 역력히 보이고 있다. 이는 X-Y단면의 경우에서 Y=2.500D인 경우에 난류강도가 최대인 점을 고려한다면 예상된 분포이다. 즉, Y=2.500D, Z=0.000D위치에 와의 충돌이 격렬하게 발생됨을 추론할 수 있다. 또한 이 현상도 하류까지 이어지는 것으로 보아

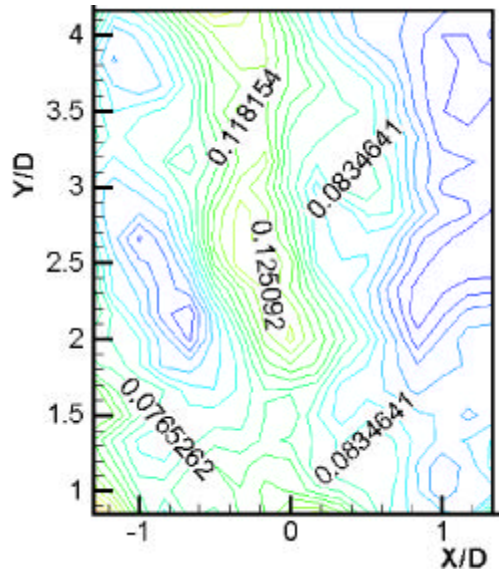
vortex trail이 존재함을 추론할 수 있는데, 이는 Brede 등[37] 이 제시하고 있는 B 모드 와운동(Fig. 5.6참조) 이 발생하고 있음이 확인되고 있다고 볼 수 있다.



(a) Measuring region

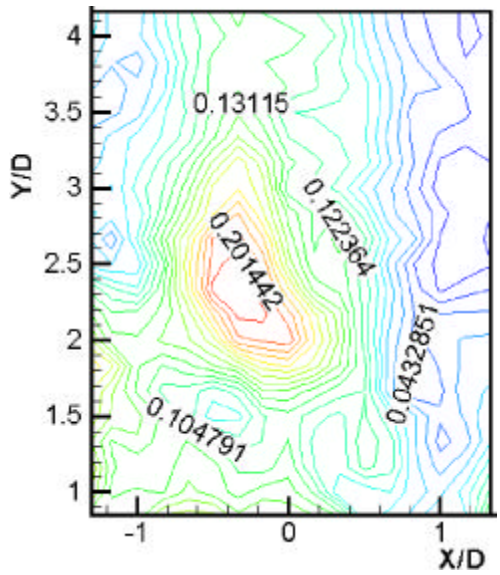


(b) Z = - 1.167D

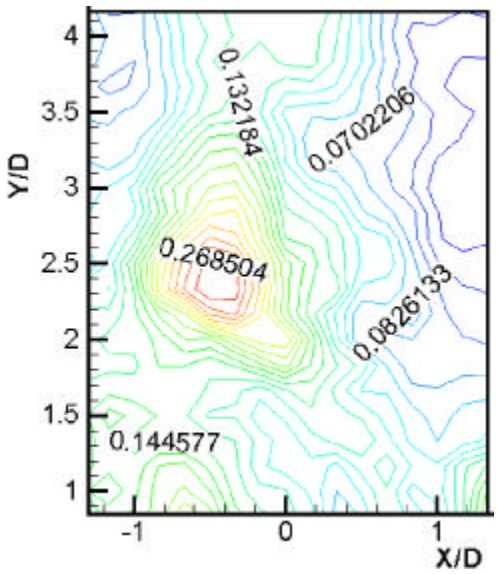


(c) Z = - 0.833D

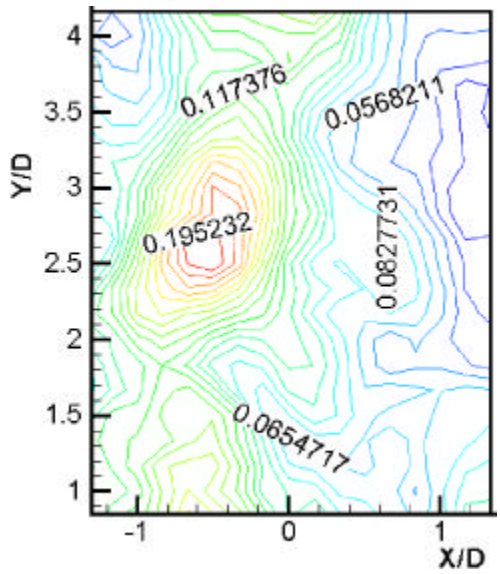
Fig. 5.8 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(d) Z = - 0.500D

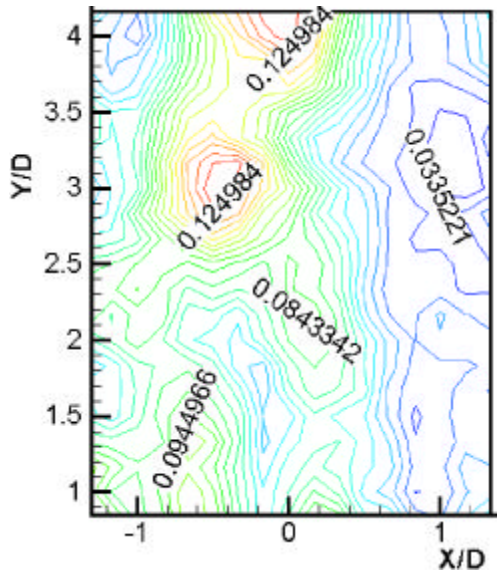


(e) Z = - 0.167D

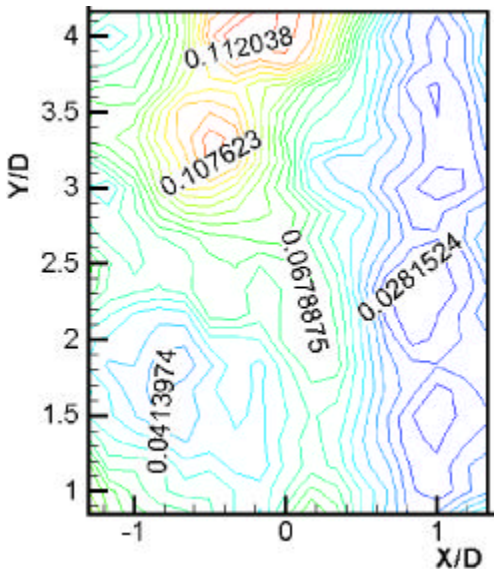


(f) Z = 0.167D

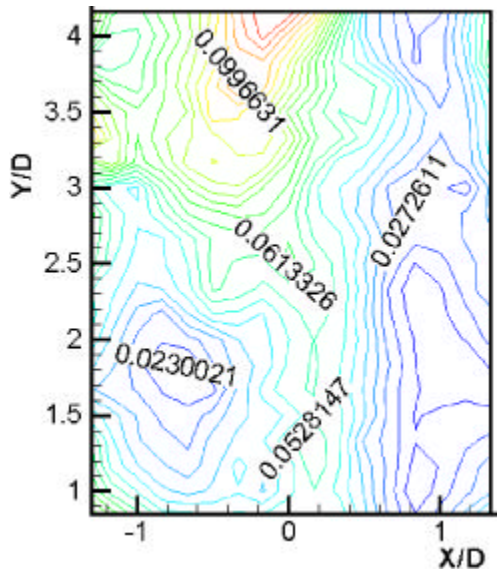
Fig. 5.8 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(g) Z = 0.500D

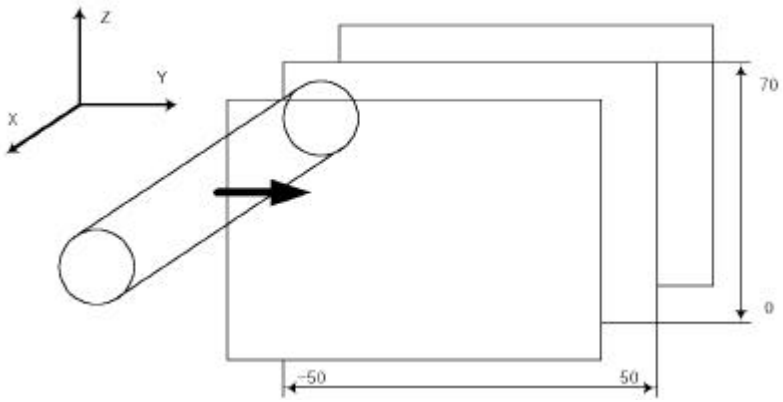


(h) Z = 0.833D

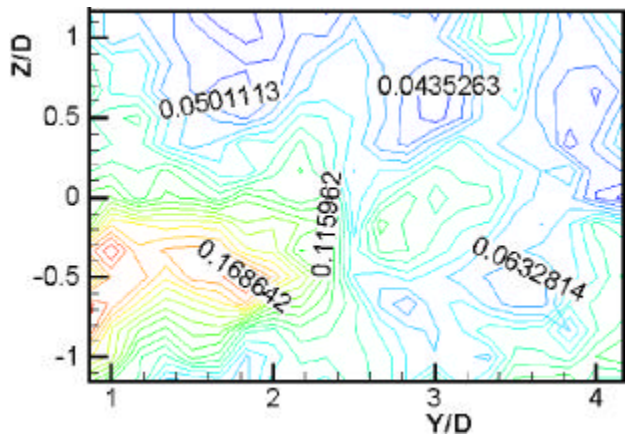


(i) Z = 1.167D

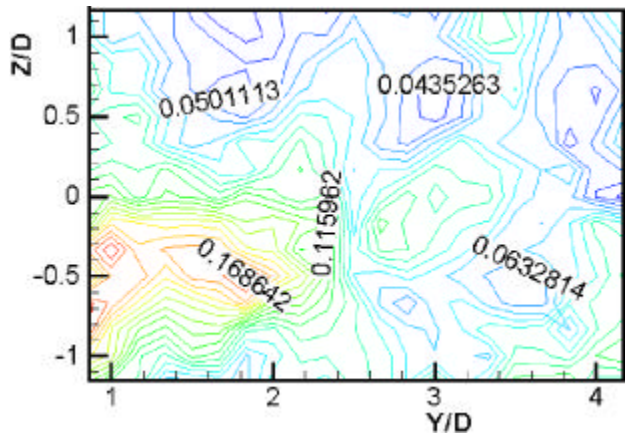
Fig. 5.8 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(a) Measuring region

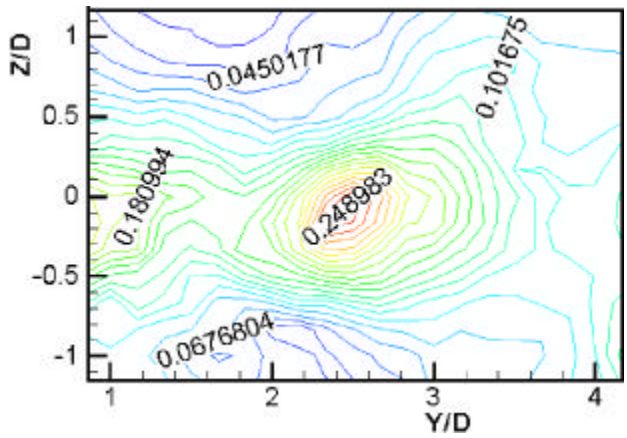


(b) X = - 1.333D

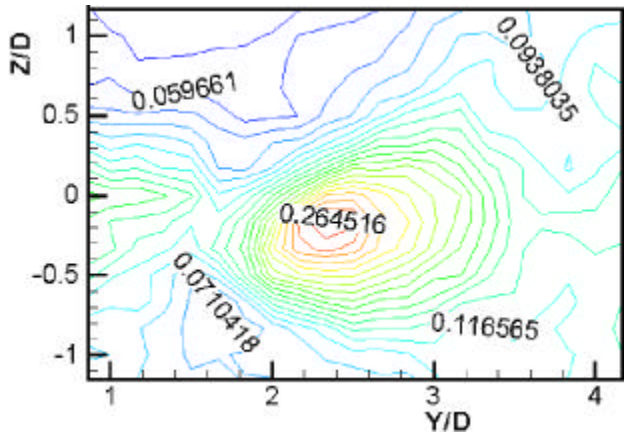


(c) X = - 1.000D

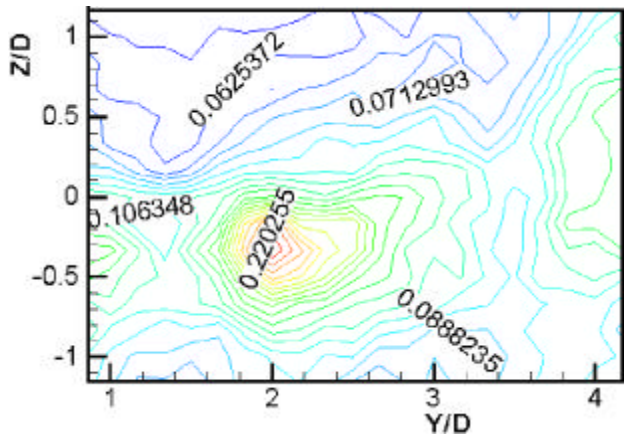
Fig. 5.9 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(d) X = - 0.667D

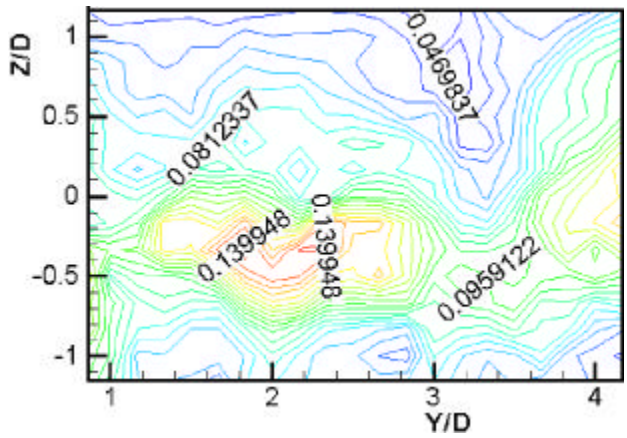


(e) X = - 0.333D

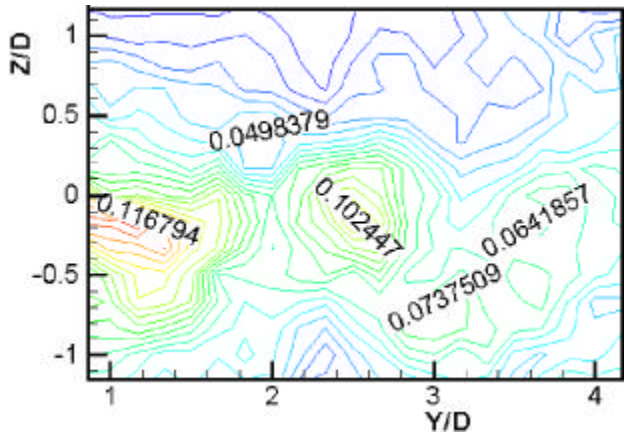


(f) X = 0.000D

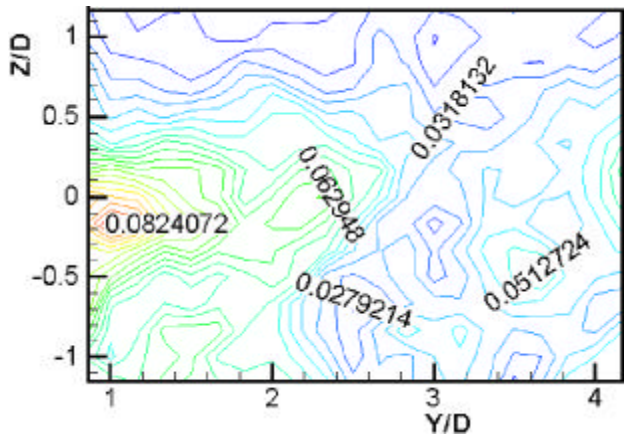
Fig. 5.9 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(g) X = 0.333D

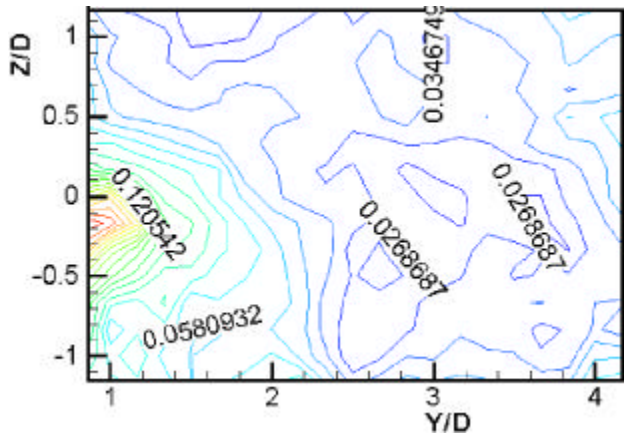


(h) X = 0.667D



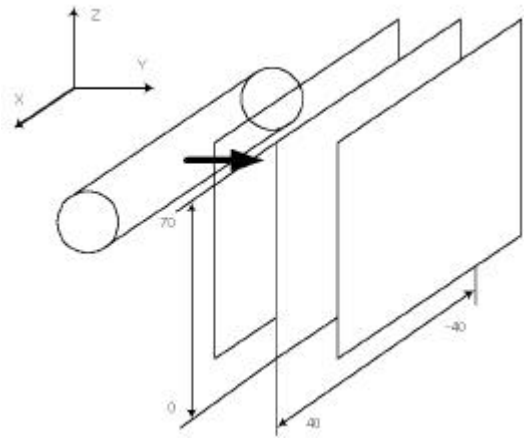
(i) X = 1.000D

Fig. 5.9 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)

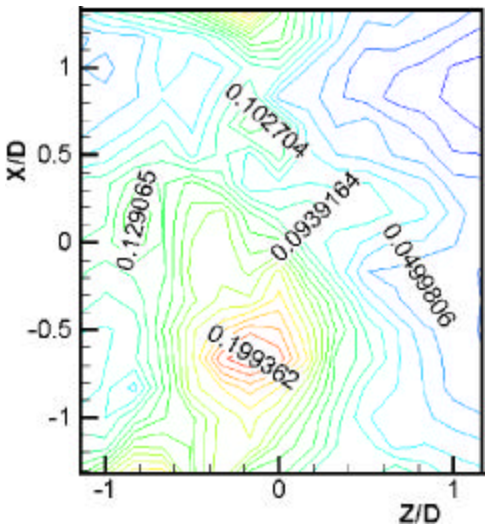


(j) X = 1.333D

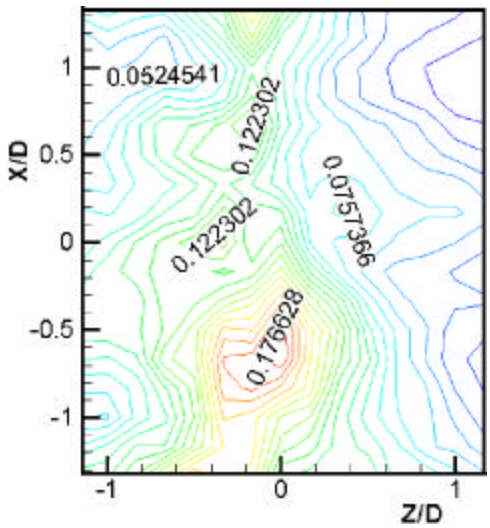
Fig. 5.9 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(a) Measuring region

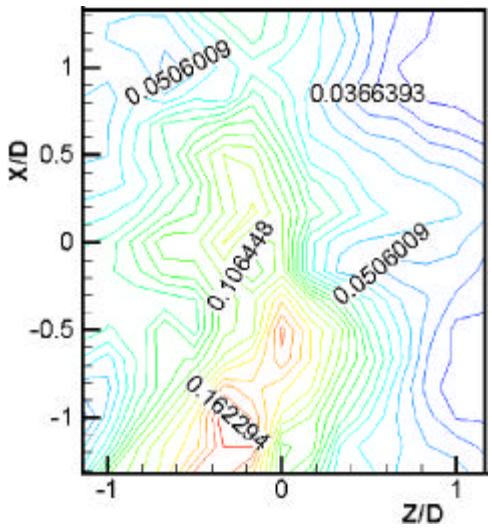


(b) Y = 0.833D

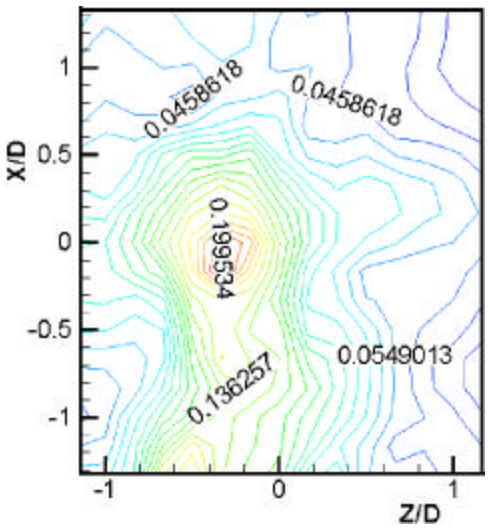


(c) Y = 1.167D

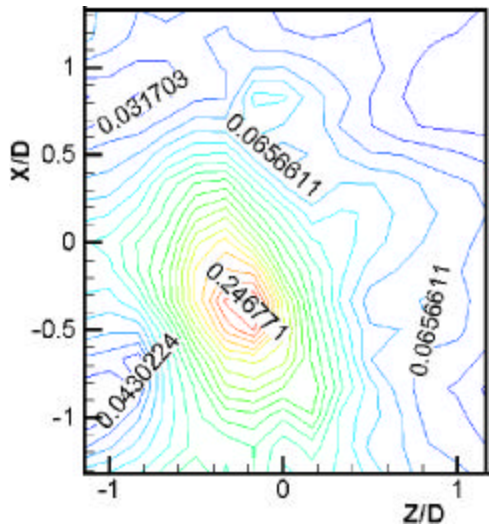
Fig. 5.10 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(d) Y = 1.500D

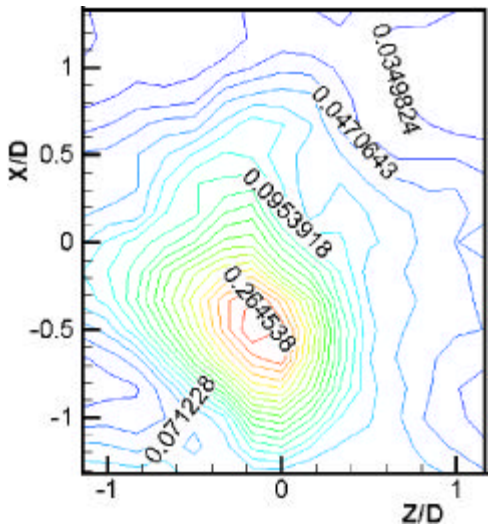


(e) Y = 1.833D

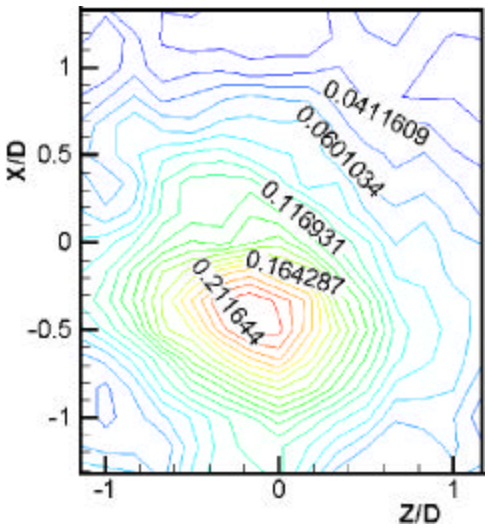


(f) Y = 2.167D

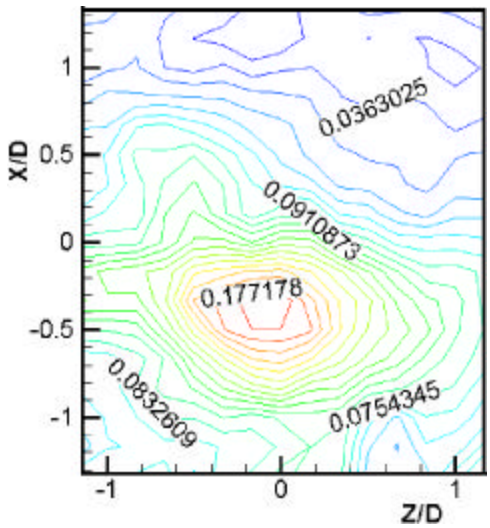
Fig. 5.10 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(g) Y = 2.500D

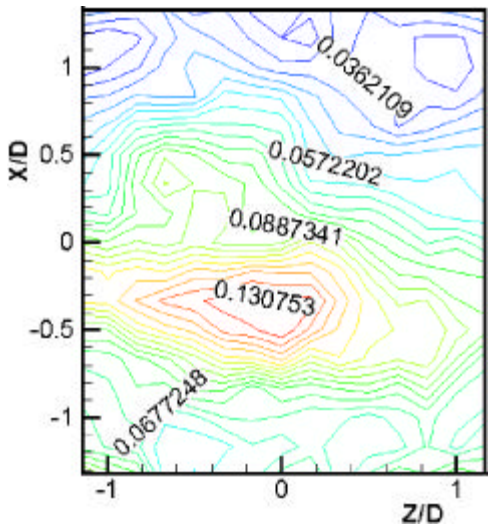


(h) Y = 2.833D

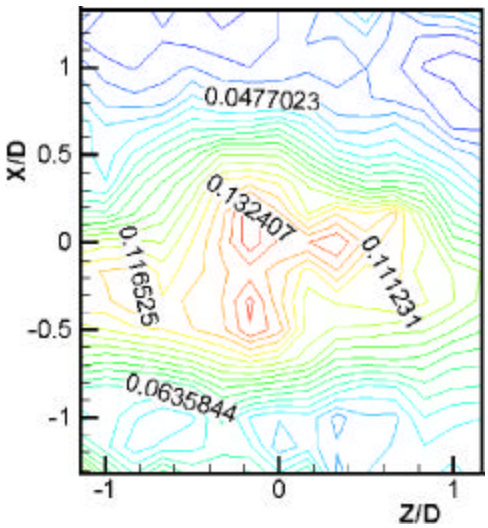


(i) Y = 3.167D

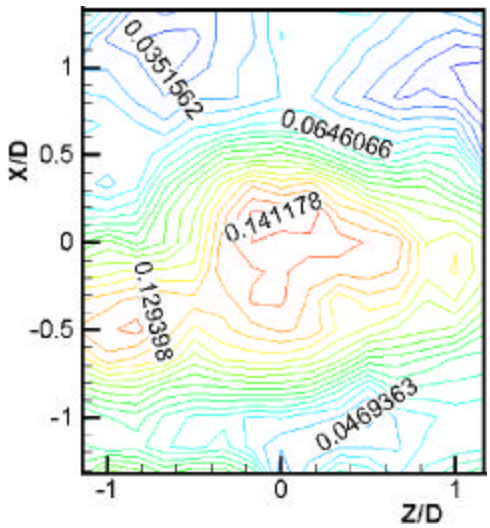
Fig. 5.10 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$) (continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

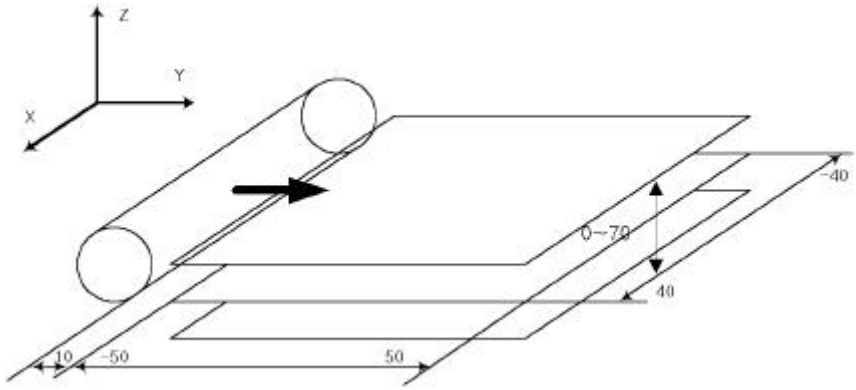
Fig. 5.10 Turbulence intensity distribution ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)

Fig. 5.11 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 난류강도(v성분)의 분포를 보이고 있다. 그림에서 Y=2.500D인 지점은 원주 중심으로부터 원주 직경을 D라 할 때 2.5D의 위치를 말하며 X=0.000D, Z=0.000D인 지점은 원주의 중심선상에 있음을 의미한다.

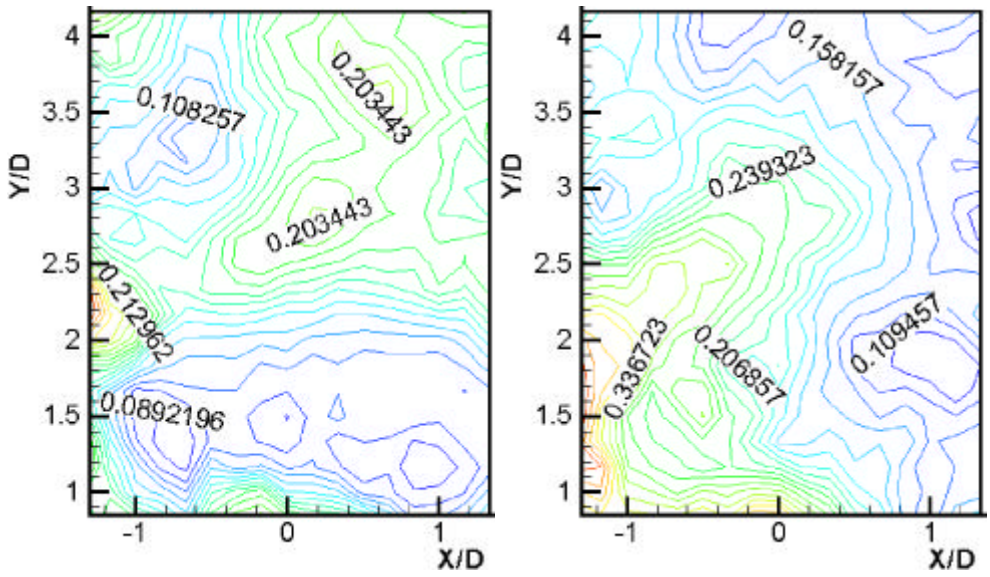
Fig. 5.11 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류강도분포(v성분)를 보이고 있다. 단면이 Z=0.000D(원주중심의 위치) 사이에 Y=1.667D부근에 최대 난류강도(0.245907)의 분포가 존재함을 알 수 있는데 이는 원주에서 떨어져 나온 와가 이 부분에서 격렬하게 Z방향으로 운동량교환을 일으키고 있음을 시사한다. 또한 X-Y의 중앙단면을 기준으로 상하 대칭적인 난류강도의 분포를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5.12는 그림에서 보이는 바와 같이 Y-Z단면의 난류강도(v성분)분포를 보이고 있다. 원주의 중심선상인 X=0.000D에서의 난류강도의 최대치는 나타나지 않고 대신에 X=-1.333D의 부근에서 최대치가 나타나 있다. 이는 X=0.000D의 부근에서는 v성분의 난류강도가 적은 것으로 보아 운동량보존의 법칙에 의거하여 spanwise 방향인 w성분의 난류강도가 상대적으로 크게 될 것임을 암시한다. 실제로 Fig. 5.14의 w성분의 난류강도분포를 보면 알 수 있다.

Fig. 5.13은 X-Z plane이 원주 근접 후류측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류강도분포(v성분)를 보이고 있다. X=-0.667D, Y=4.000D, Z=-0.167D부근에서 매우 큰 난류강도분포를 보이고 있으며, 이는 하류로 늘어떨인 vortex trail이 원주 중심(Z=0.000D)선 부근에 가장 많이 분포되어 있음을 의미한다. Z=0.000D(원주중심의 위치)부근의 단면을 기준으로 상하 단면에서의 분포가 매우 대칭적으로 유사함을 알 수 있다.



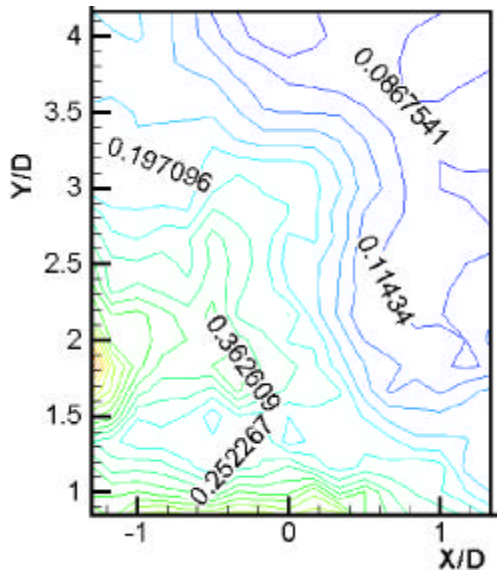
(a) Measuring region



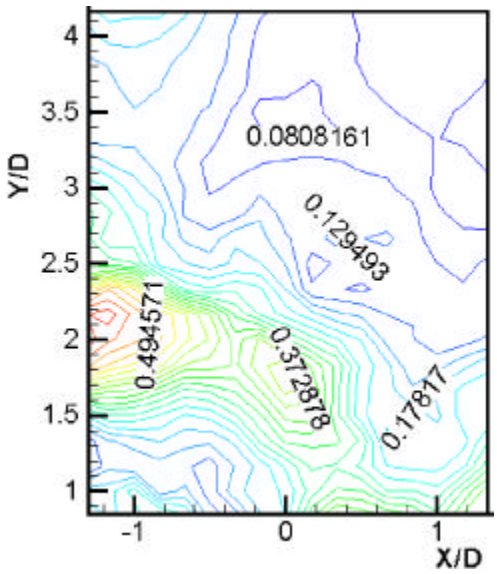
(b) Z = - 1.167D

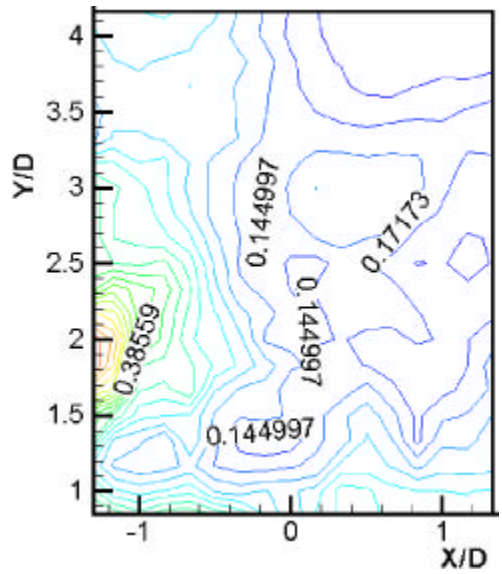
(c) Z = - 0.833D

Fig. 5.11 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(d) Z = - 0.500D

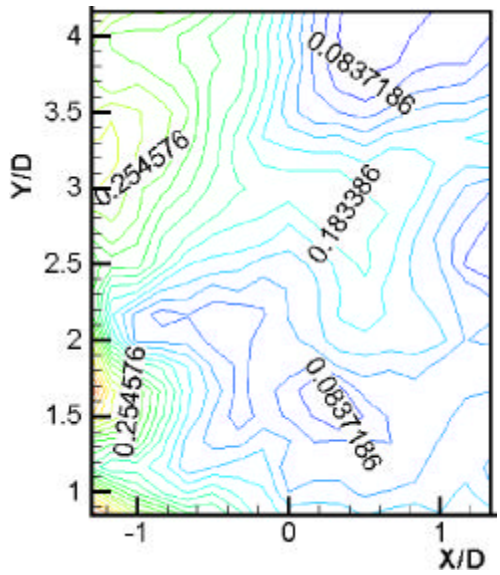




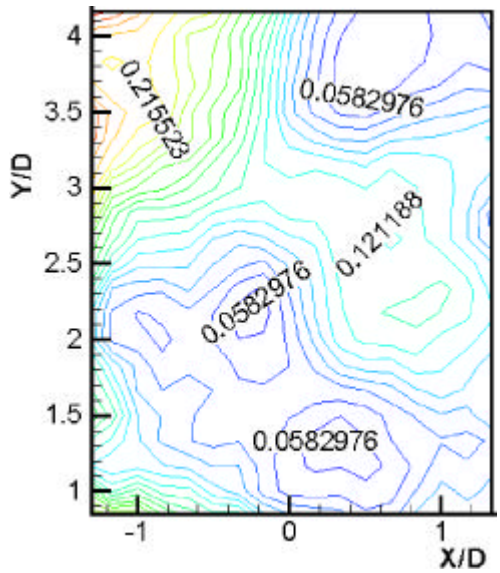
(e) Z = - 0.167D

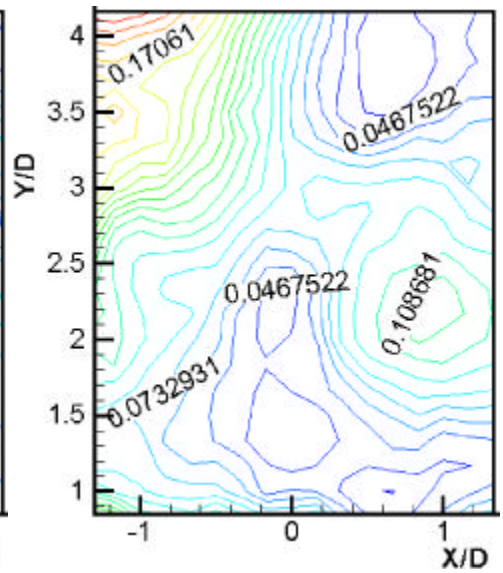
(f) Z = 0.167D

Fig. 5.11 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(g) Z = 0.500D

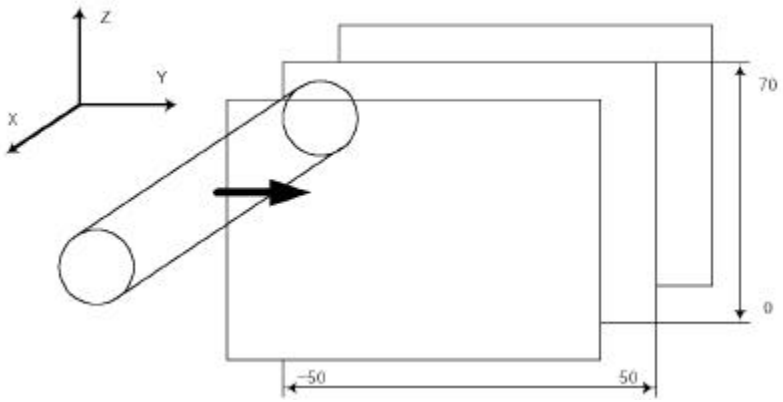




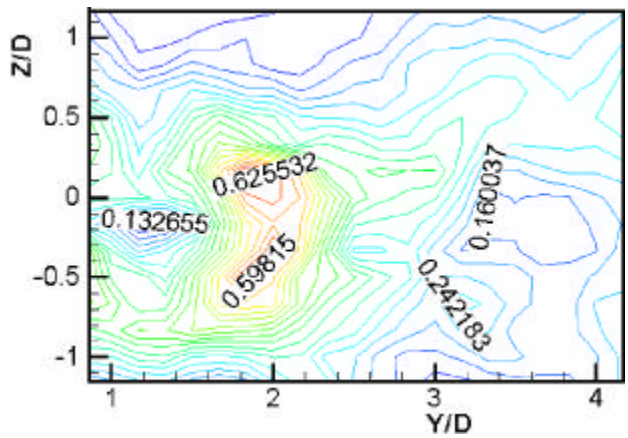
(h) Z = 0.833D

(i) Z = 1.167D

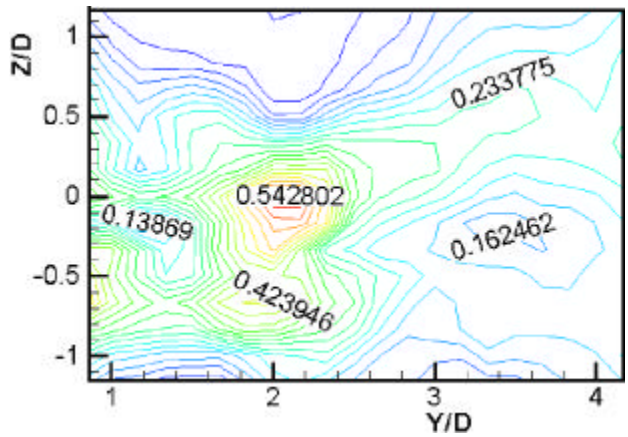
Fig. 5.11 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(a) Measuring region

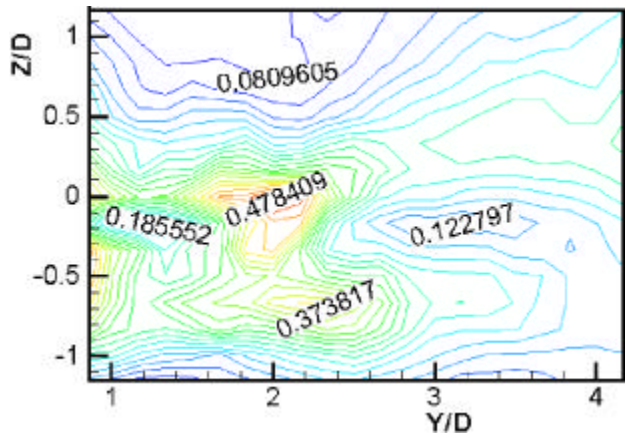


(b) X = - 1.333D

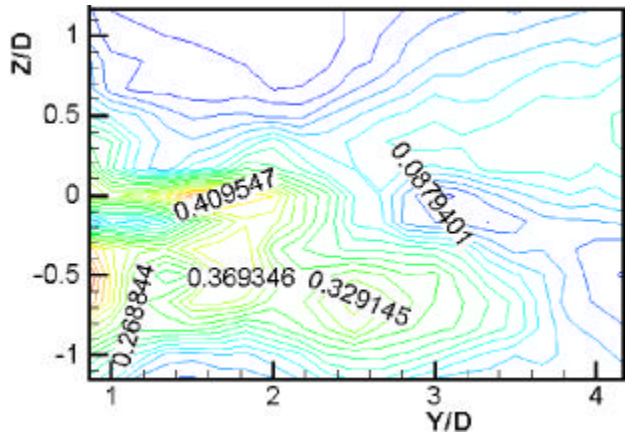


(c) X = - 1.000D

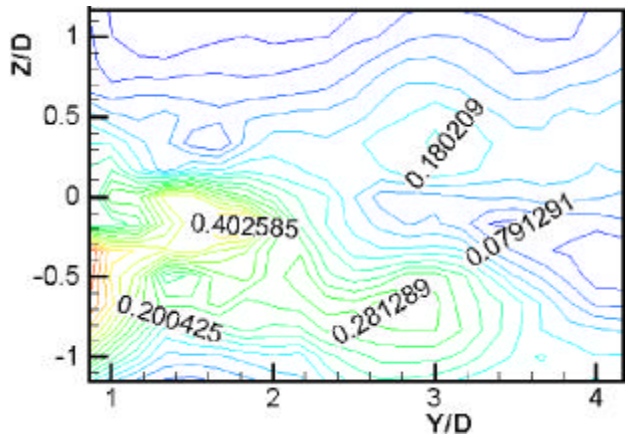
Fig. 5.12 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(d) X = - 0.667D

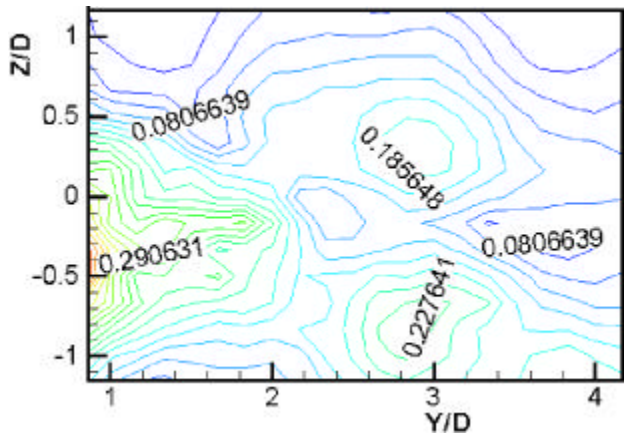


(e) X = - 0.333D

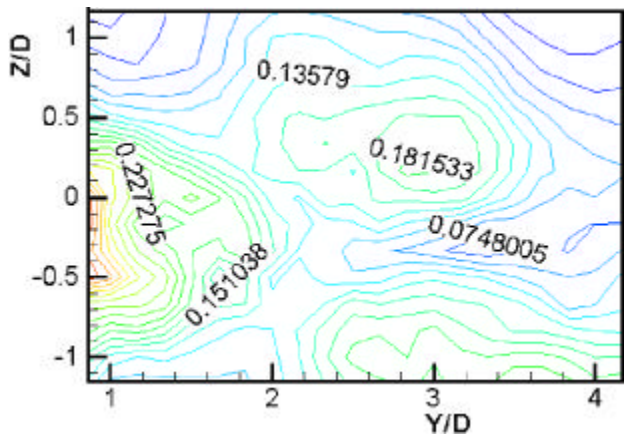


(f) X = 0.000D

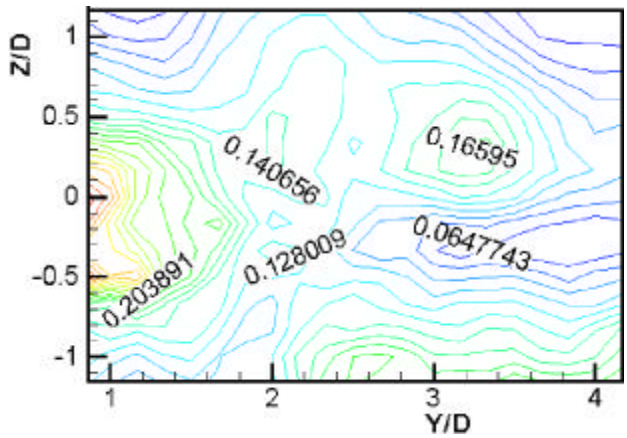
Fig. 5.12 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(g) X = 0.333D

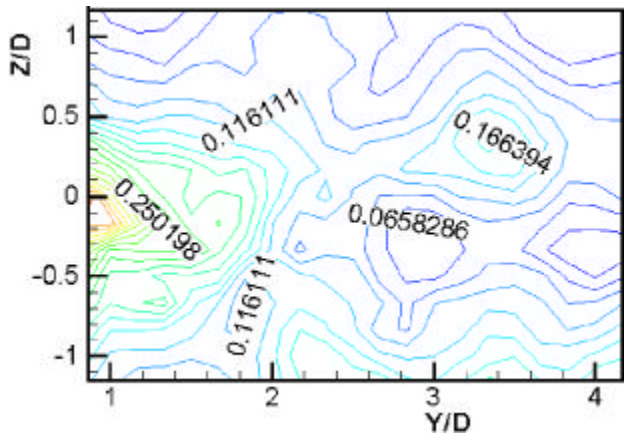


(h) X = 0.667D



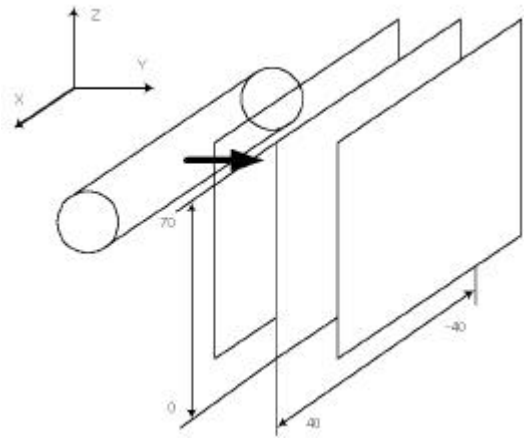
(i) X = 1.000D

Fig. 5.12 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)

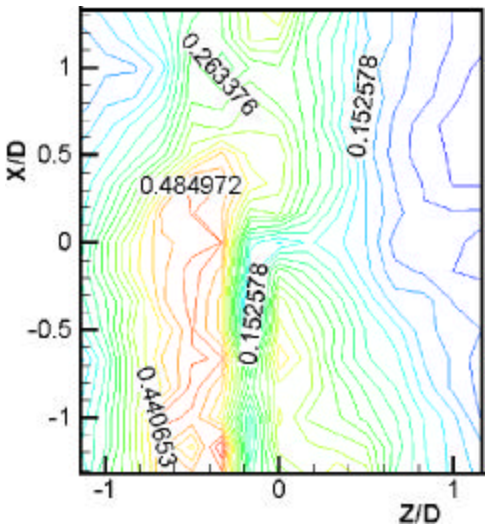


(j) X = 1.333D

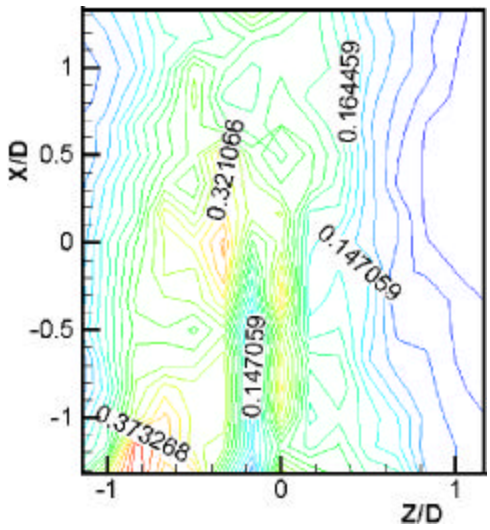
Fig. 5.12 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(a) Measuring region

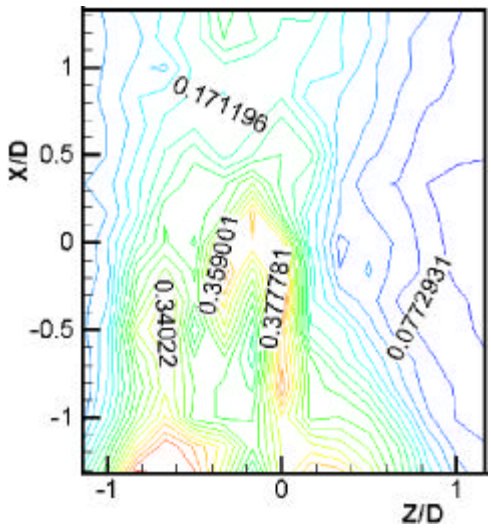


(b) Y = 0.833D

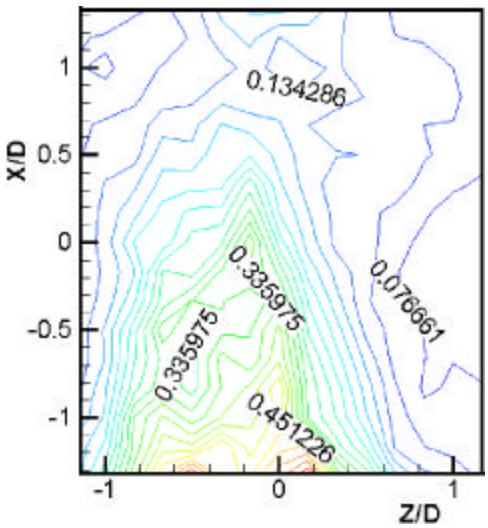


(c) Y = 1.167D

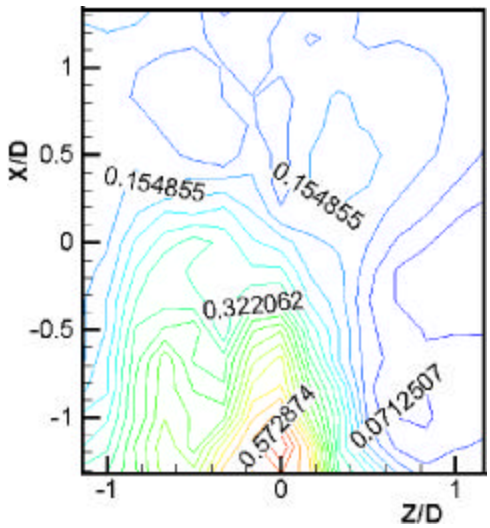
Fig. 5.13 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(d) Y = 1.500D

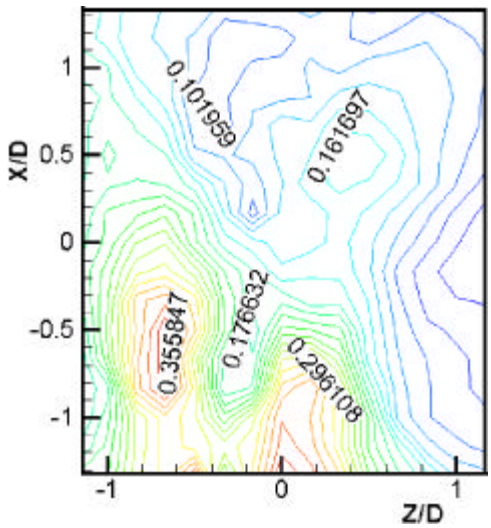


(e) Y = 1.833D

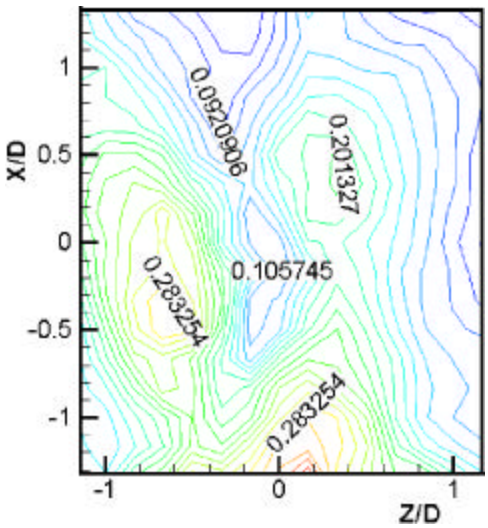


(f) Y = 2.167D

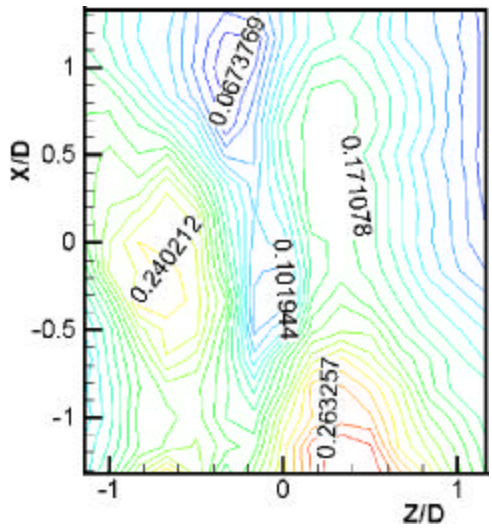
Fig. 5.13 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(g) Y = 2.500D

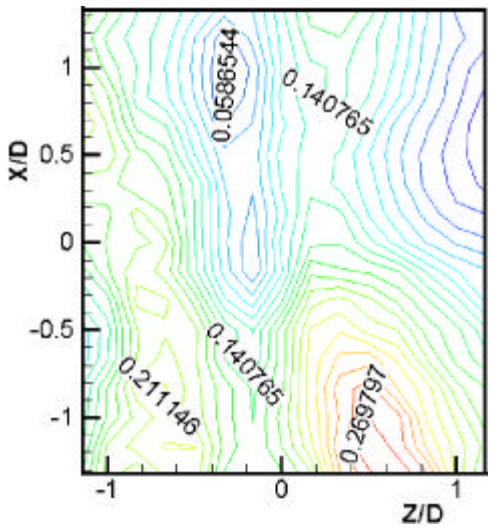


(h) Y = 2.833D

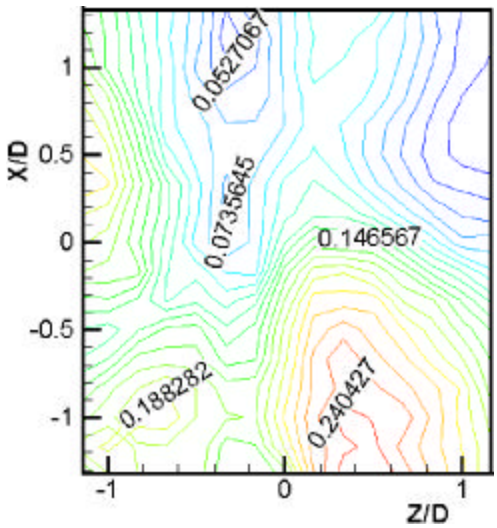


(i) Y = 3.167D

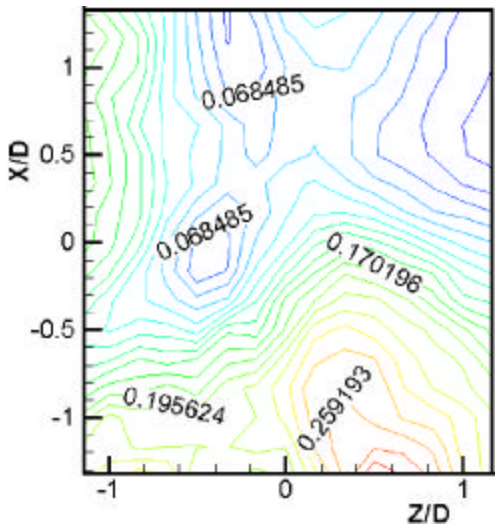
Fig. 5.13 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

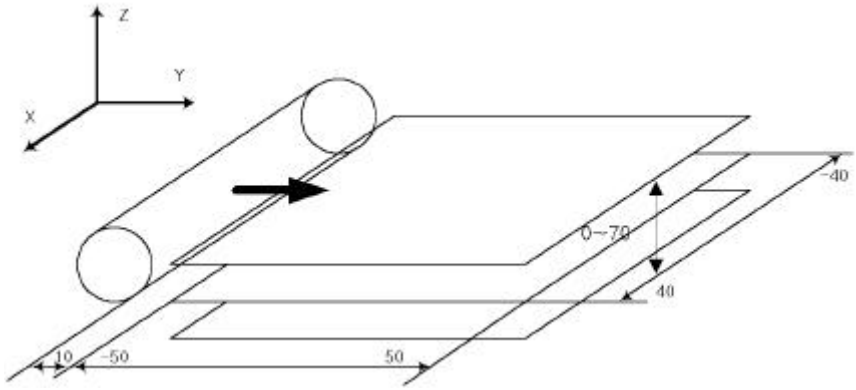
Fig. 5.13 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$) (continued)

Fig. 5.14 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 난류강도(w성분)의 분포를 보이고 있다. 그림에서 Y=2.500D인 지점은 원주 중심으로부터 원주 직경을 D라 할 때 2.500D의 위치를 말하며 X=0.000D, Z=0.000D인 지점은 원주의 중심선상에 있음을 의미한다.

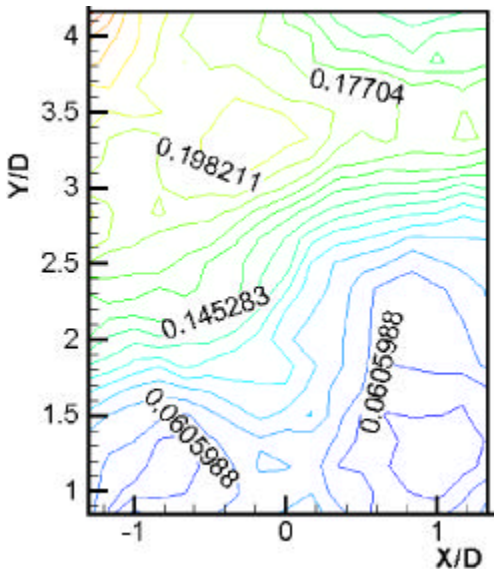
Fig. 5.14 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류강도분포(w성분)를 보이고 있다. Y=2.5D, Z=0.000D(원주 중심의 위치), X=0.000D부근에서 최대의 w방향 난류강도분포를 보이고 있으며 Z방향으로의 단면이 상하로 조금 벗어나면 갑자기 이들 값들의 크기가 작아지면서 분포의 형태도 급변하는 것으로 보아 w방향 난류강도는 특정지역에서 집중적인 분포의 경향을 보이고 있다고 말할 수 있다. 이는 X방향으로 난류에너지의 dissipation 이 강하게 일어나는 곳이라고 볼 수 있다. 또한, Z=0.000D에서의 단면을 기준으로 상하 단면상에서는 서로 대칭으로 유사한 값의 분포를 지닌 것으로 보아 spanwise방향의 난류강도는 상기 특정 집중지역을 제외한 단면에서는 균일한 분포(homogeneous)를 하고 있다고 추론할 수 있다.

Fig. 5.15는 그림에서 보이는 바와 같이 Y-Z단면의 난류강도(w성분)분포를 보이고 있다. X=-0.333D, Y=2.500D, Z=-0.333D에서 난류강도(w성분)의 최대치가 나타나 있음을 알 수 있다. 또한, 이 최대치가 나타나는 영역은 X축 방향을 따라 한 줄로 늘어 서 있는 것처럼 보인다. 이로부터 B 모드(Fig. 5.6)의 와운동이 발생되고 있음을 알 수 있다.

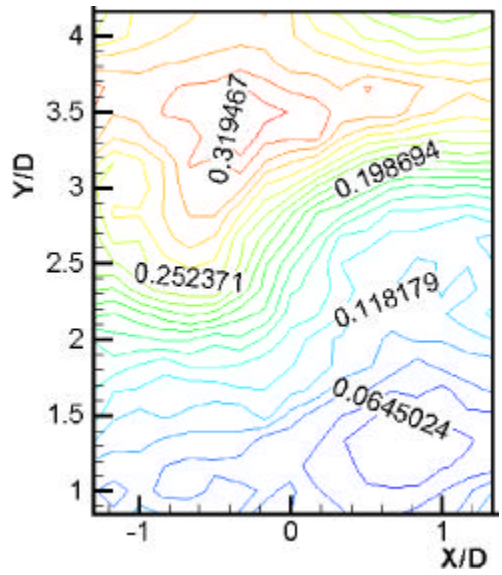
Fig. 5.16은 X-Z plane이 원주 근접 후류측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류강도분포(w성분)를 보이고 있다. X=-0.500D, Y=3.500D, Z=-0.333D부근에서 매우 큰 난류강도분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 원주 후부부터 하류방향으로 Y=2.500D까지는 Z=-0.333D를 상하로 하여 균일한 분포를 보이고 있다가 Y=2.500D 이후부터는 급작스럽게 증가하는 경향을 볼 수가 있는데 이는 이 곳에서 와류들이 만나게 되어 격렬한 X방향으로 운동량교환을 일으키는 곳으로 볼 수 있다. 그 이후의 하류방향에서는 난류운동에너지가 균일화 되어감을 알 수 있다.



(a) Measuring region

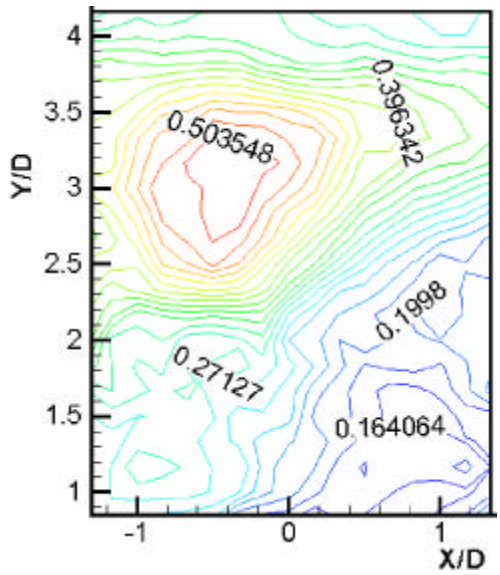


(b) Z = - 1.167D

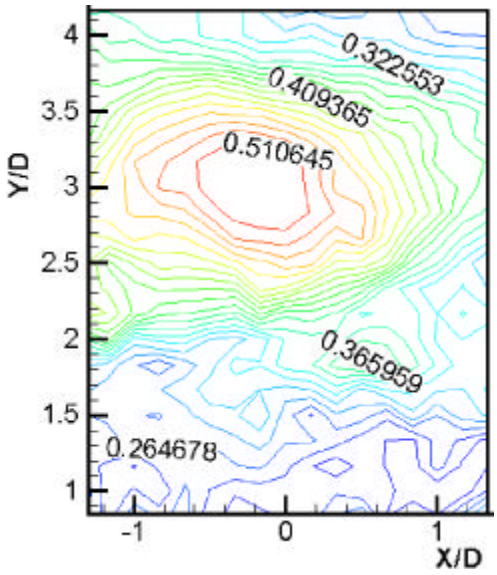


(c) Z = - 0.833D

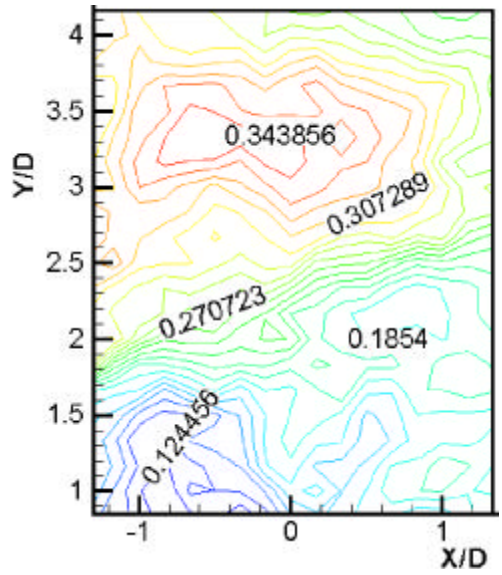
Fig. 5.14 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(d) Z = - 0.500D

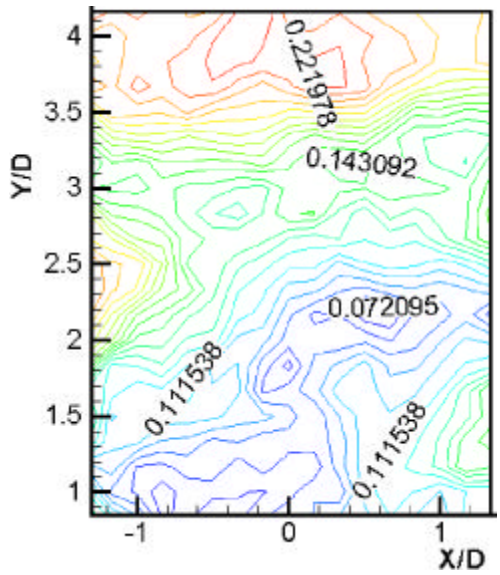


(e) Z = - 0.167D

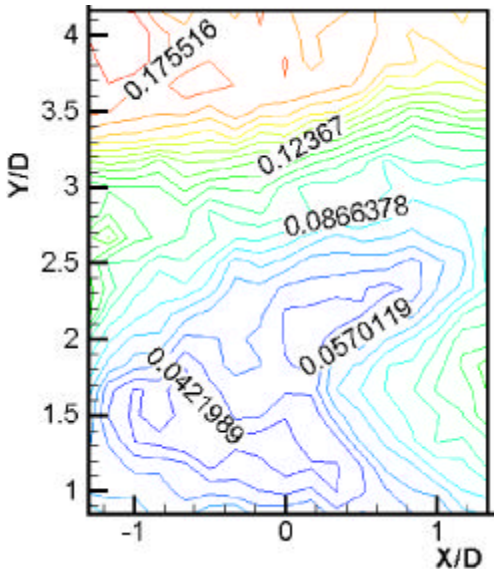


(f) Z = 0.167D

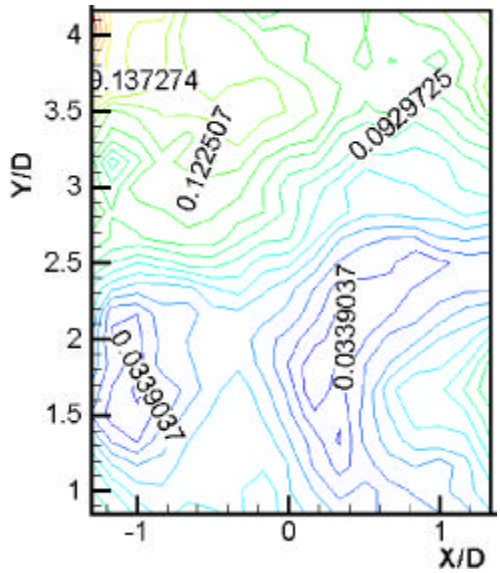
Fig. 5.14 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(g) Z = 0.500D

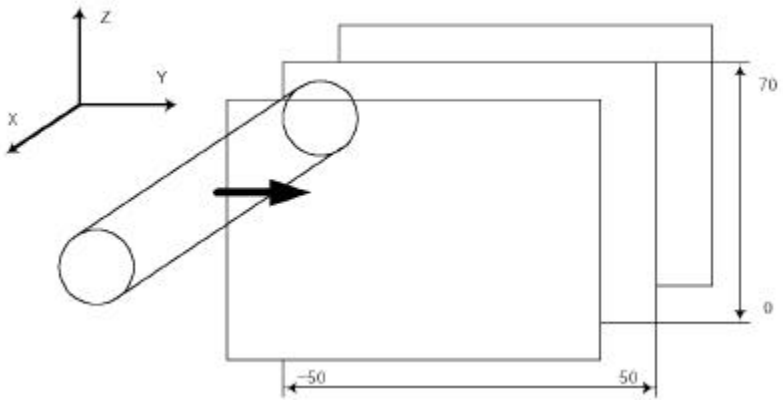


(h) Z = 0.833D

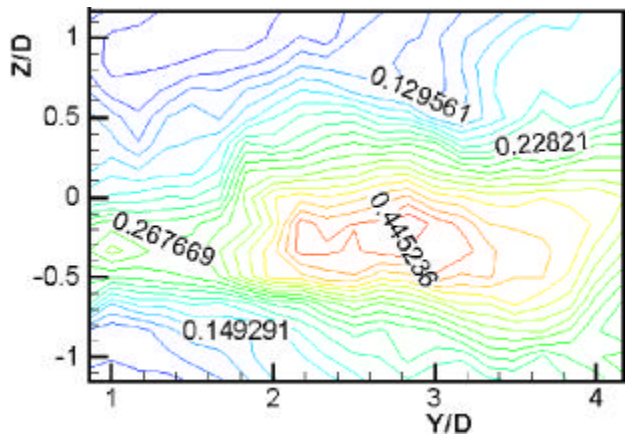


(i) Z = 0.167D

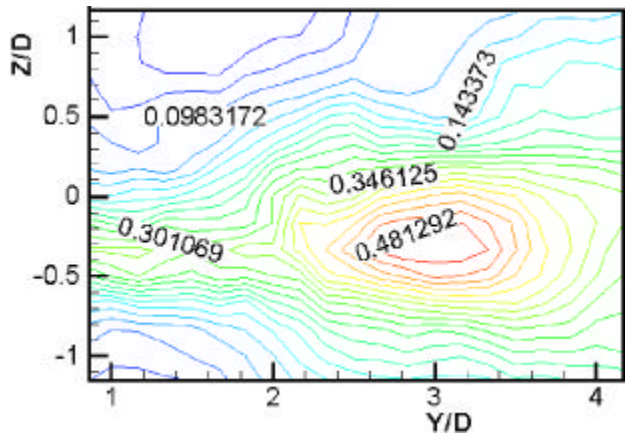
Fig. 5.14 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(a) Measuring region

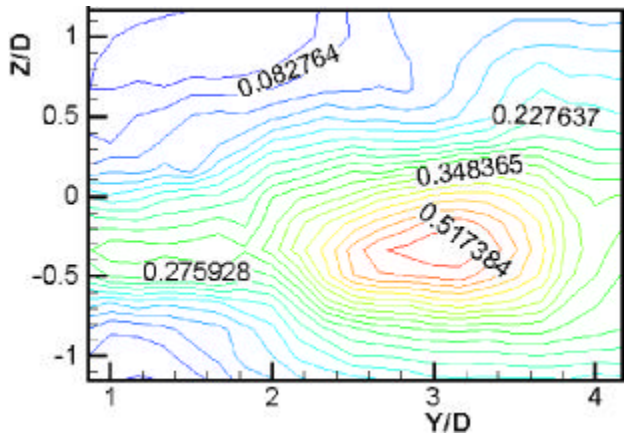


(b) X = - 1.333D

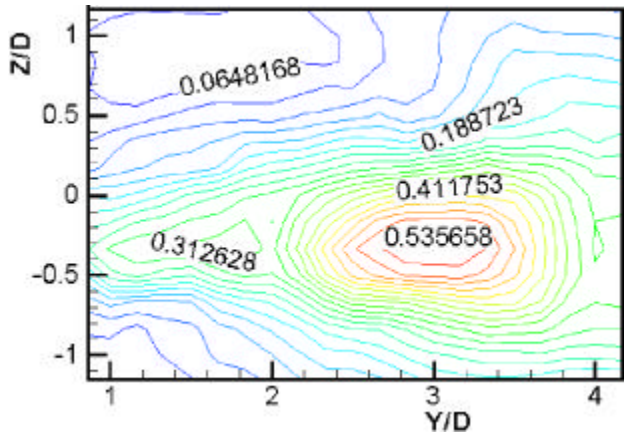


(c) X = - 1.000D

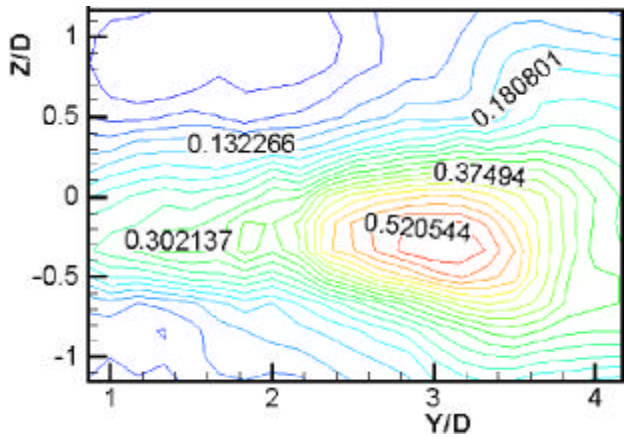
Fig. 5.15 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(d) X = - 0.667D

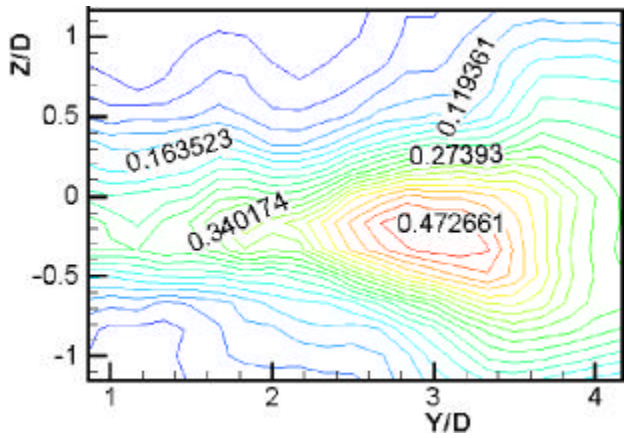


(e) X = - 0.333D

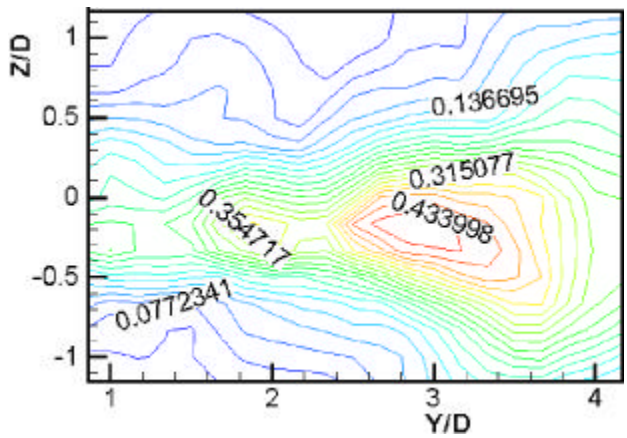


(f) X = 0.000D

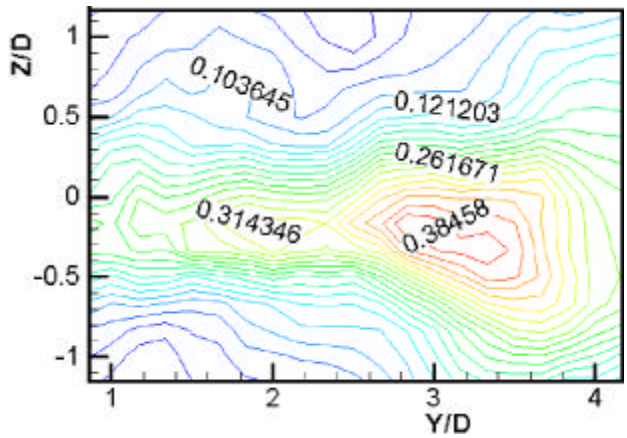
Fig. 5.15 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(g) X = 0.333D

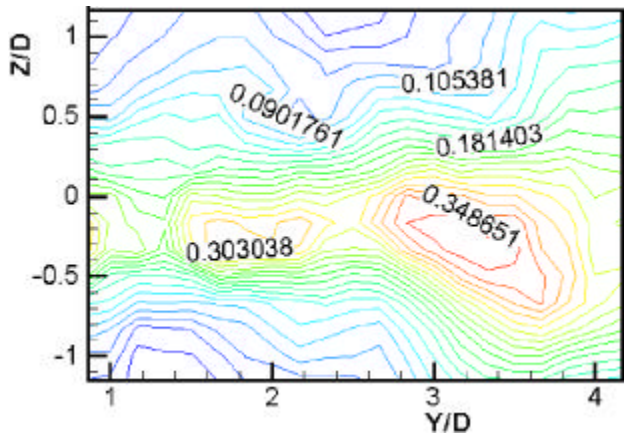


(h) X = 0.667D



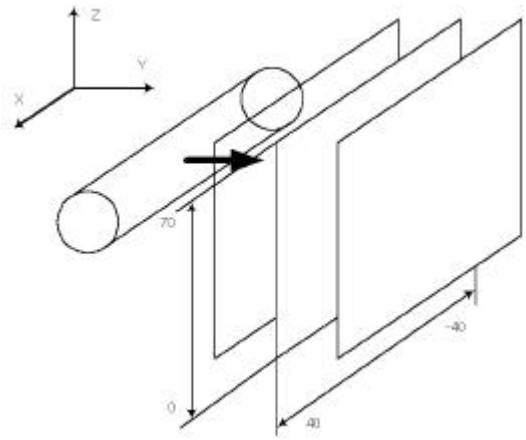
(i) X = 1.000D

Fig. 5.15 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)

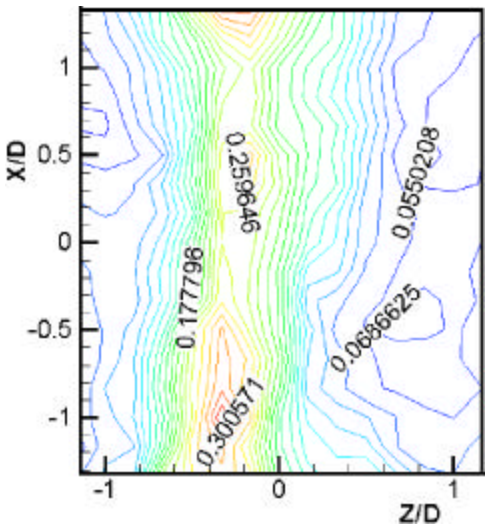


(j) X = 1.333D

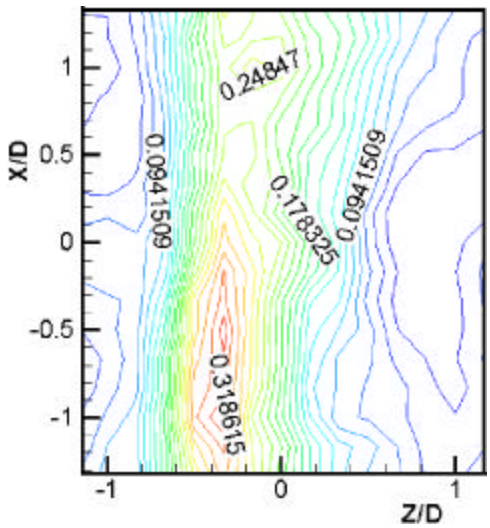
Fig. 5.15 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(a) Measuring region

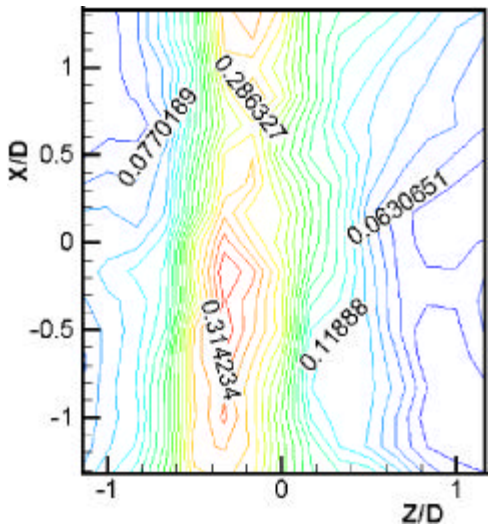


(b) Y = 0.833D

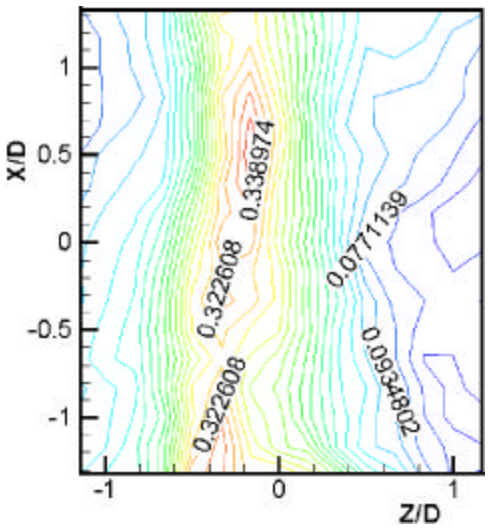


(c) Y = 1.167D

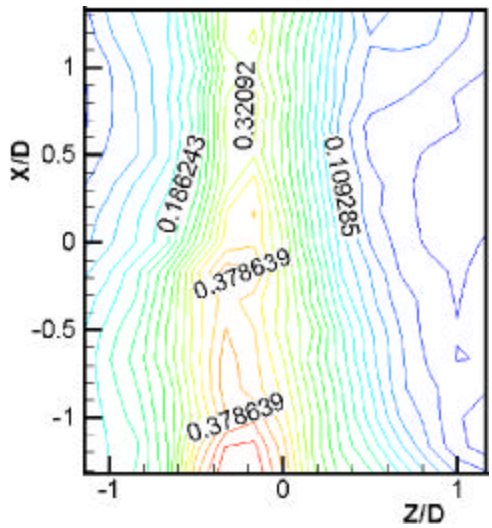
Fig. 5.16 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(d) Y = 1.500D

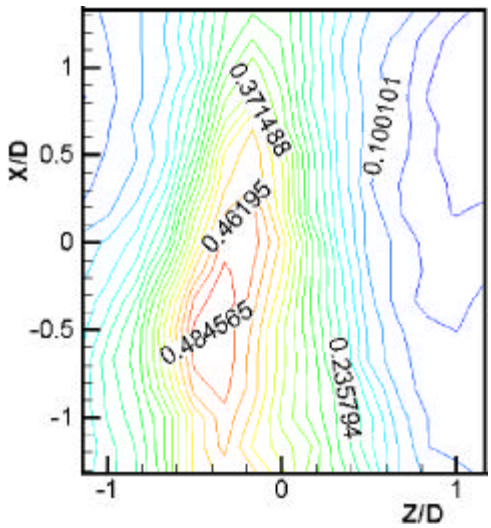


(e) Y = 1.833D

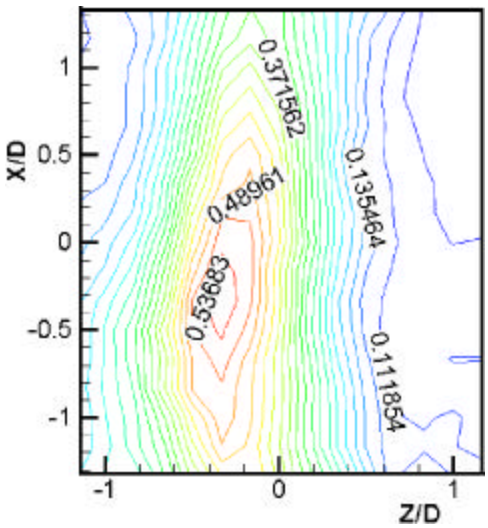


(f) Y = 2.167D

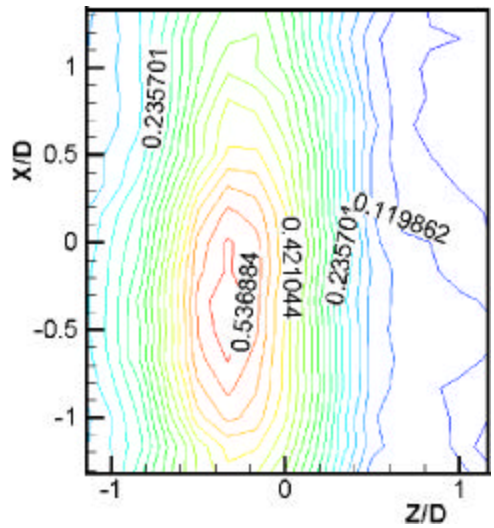
Fig. 5.16 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(g) Y = 2.500D

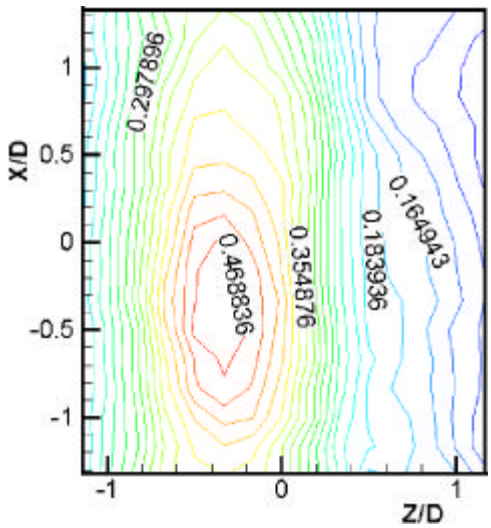


(h) Y = 2.833D

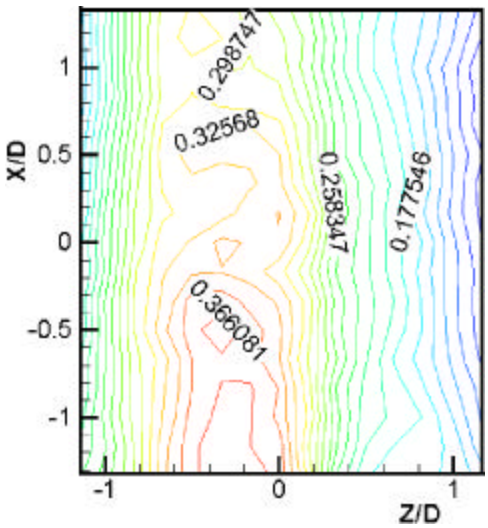


(i) Y = 3.167D

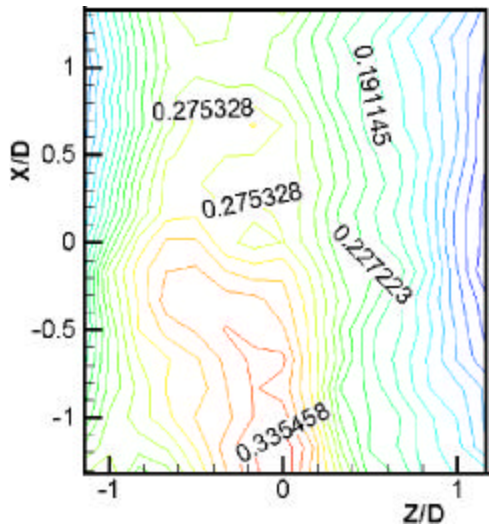
Fig. 5.16 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

Fig. 5.16 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$) (continued)

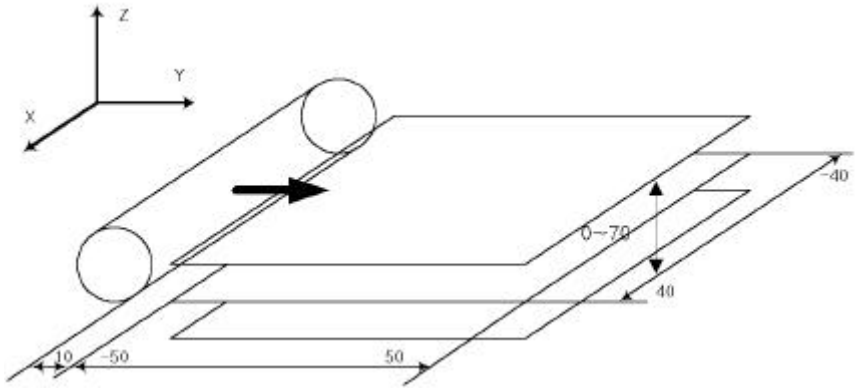
5.3 각 단면에서의 난류운동에너지 분포

Fig. 5.17 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 난류운동에너지의 분포를 보이고 있다. 그림에서 Y=2.500D인 지점은 원주 중심으로부터 원주 직경을 D라 할 때 2.500D의 위치를 말하며 X=0.000D, Z=0.000D인 지점은 원주의 중심선상에 있음을 의미한다.

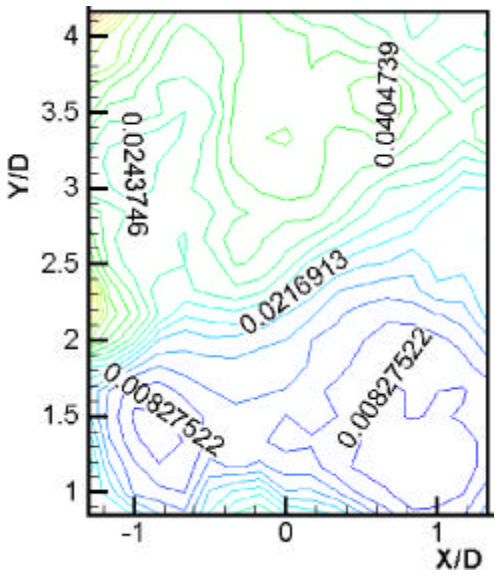
Fig. 5.17 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류운동에너지의 분포를 보이고 있다.

Fig. 5.18은 Y-Z단면의 난류운동에너지분포를 보이고 있다. 이들 그림들을 살펴보면, X=-0.333D, Y=2.500D, Z=-0.500D부근에서 집중적으로 최대 난류운동에너지 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이곳에서 와의 3차원적 거동이 가장 심하게 일어나고 있음을 추론할 수 있다. 난류운동에너지가 가장 심하게 일어나는 island로 볼 수 있다. Fig. 5.18 (b) (j)의 Y-Z plane상에 보이는 난류운동에너지 분포를 살펴보면, X=-1.333D, Y=2.000D, Z=-0.333D & Z=0.000D에서 강한 난류운동에너지가 존재하면서 매우 대칭적인 특징을 찾아 볼 수 있는데, 이는 수조의 벽면의 영향으로 2차원적 유동이 강하게 있음을 시사한다. 벽면이 존재하게 되면 3차원적인 와의 운동영향보다 2차원적인 와의 운동이 강하게 나타나게 되므로 상하 대칭이 되어야 함은 직관적으로도 예측될 수 있는 사실이다. 다시 말하면, 위의 난류통계치들에 대한 정량적 결과는 타당한 결과를 보이고 있음을 반증한다고 볼 수 있다.

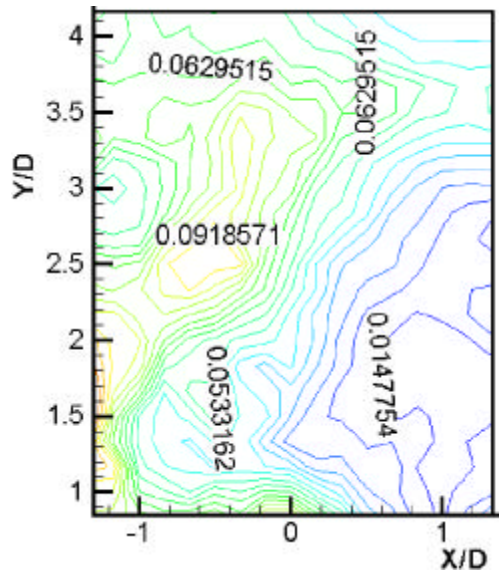
Fig. 5.19는 X-Z plane이 원주 근접후류 측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 난류운동에너지분포를 보이고 있다.



(a) Measuring region



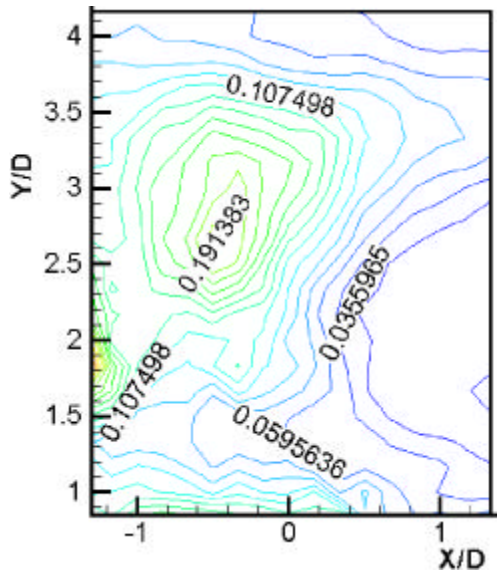
(b) Z = - 1.167D



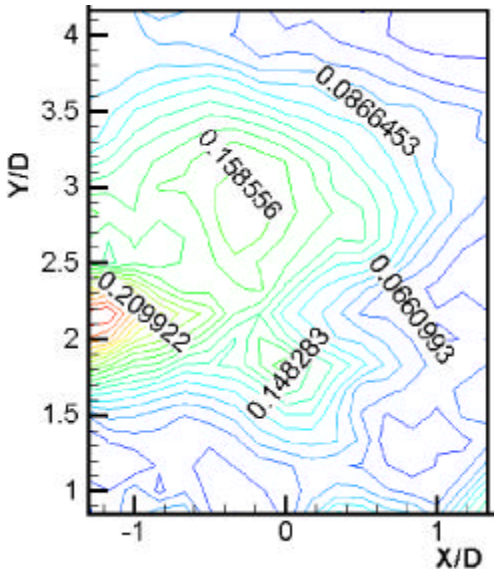
(c) Z = - 0.833D

Fig. 5.17 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

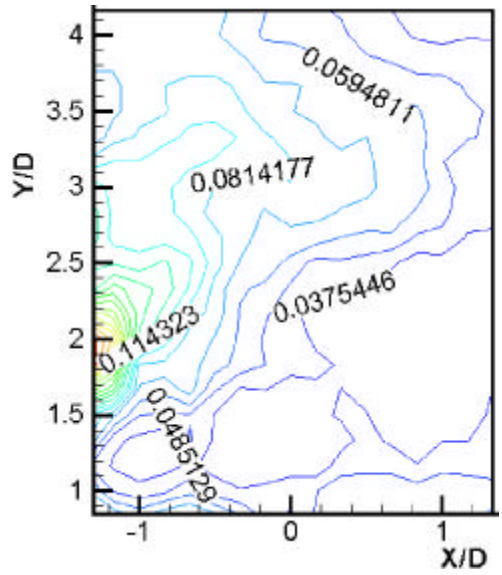
(continued)



(d) Z = - 0.500D



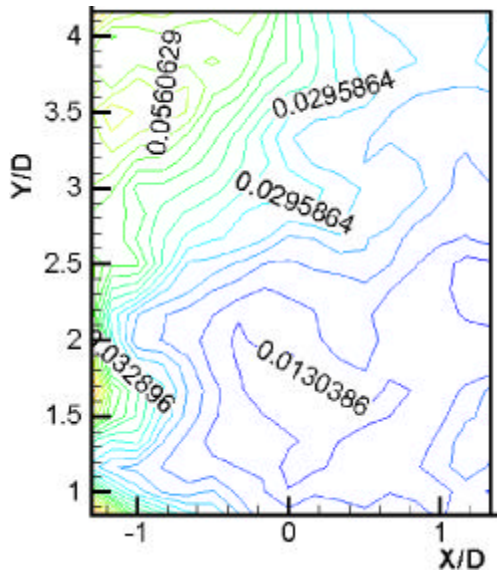
(e) Z = - 0.167D



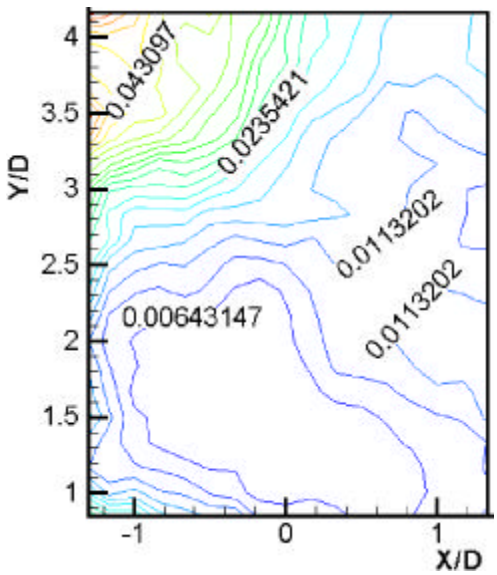
(f) Z = 0.167D

Fig. 5.17 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

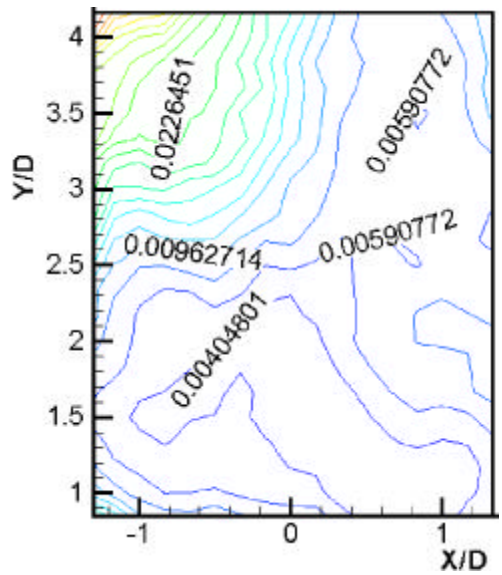
(continued)



(g) Z = 0.500D



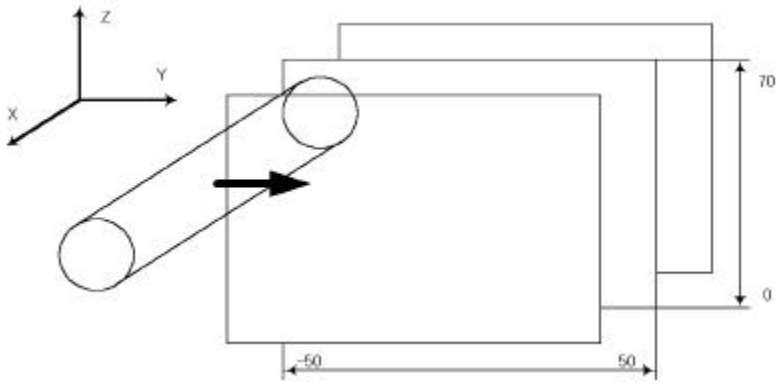
(h) Z = 0.833D



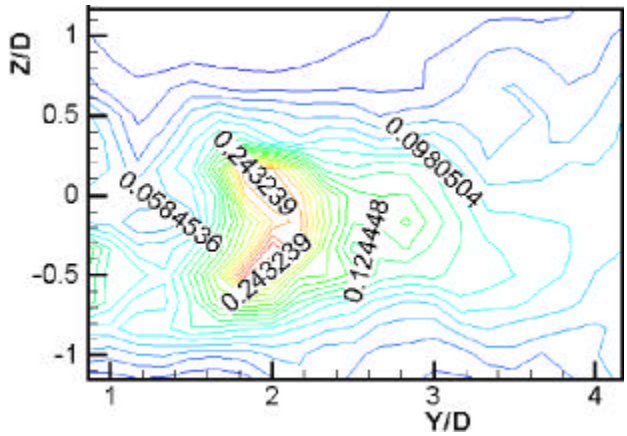
(i) Z = 1.167D

Fig. 5.17 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

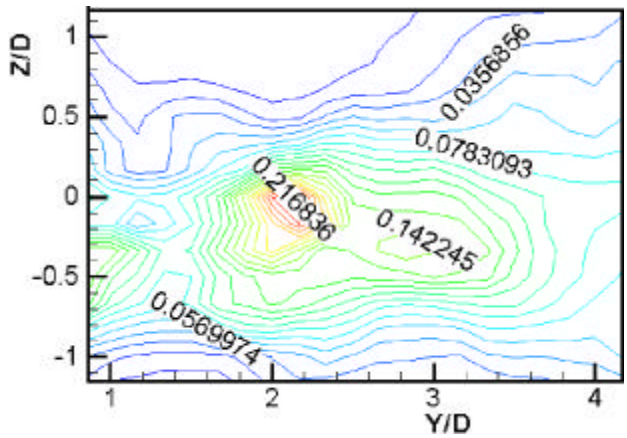
(continued)



(a) Measuring region



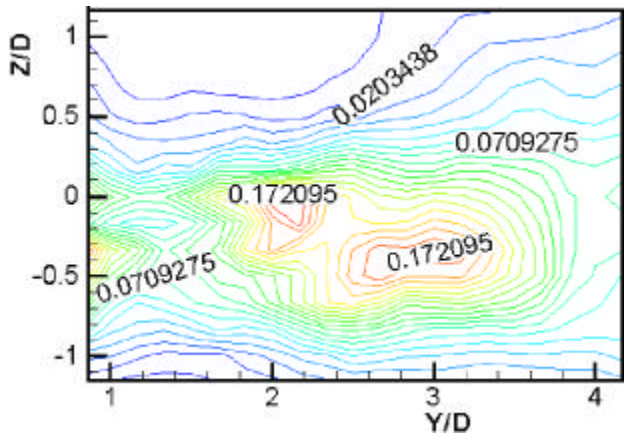
(b) X = - 1.333D



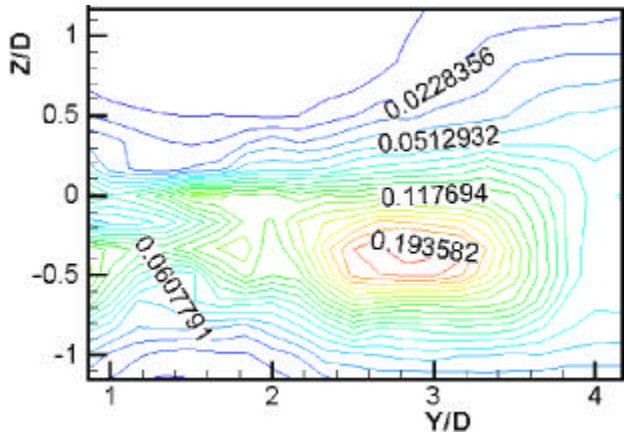
(c) X = - 1.000D

Fig. 5.18 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

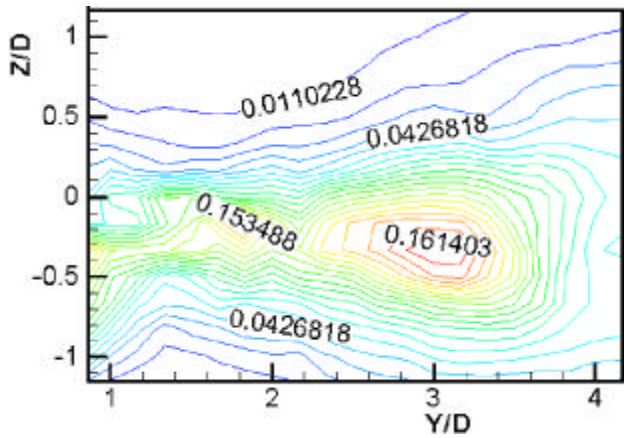
(continued)



(d) X = - 0.667D

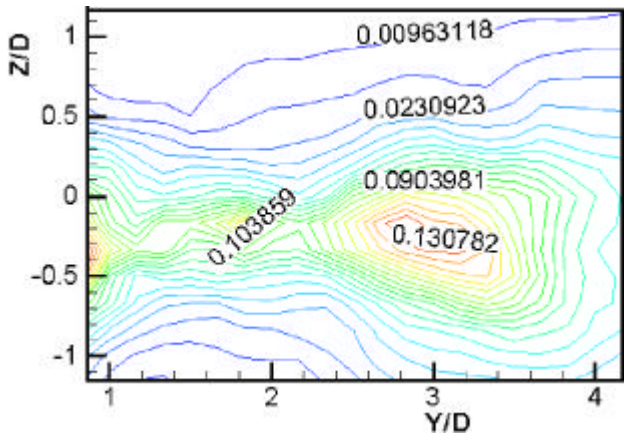


(e) X = - 0.333D

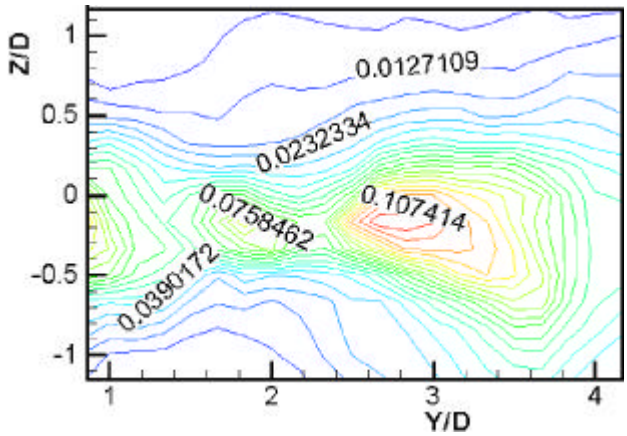


(f) X = 0.000D

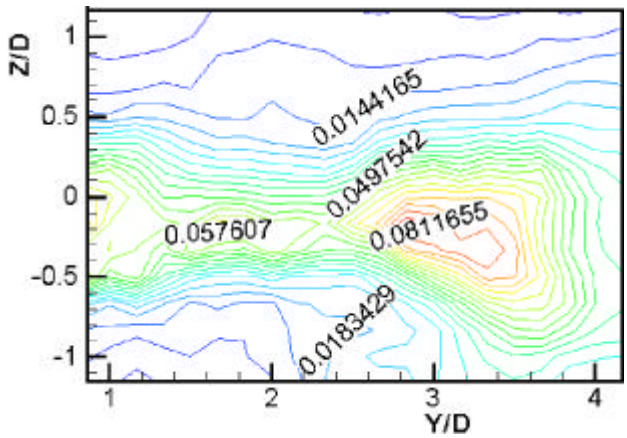
Fig. 5.18 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)



(g) X = 0.333D

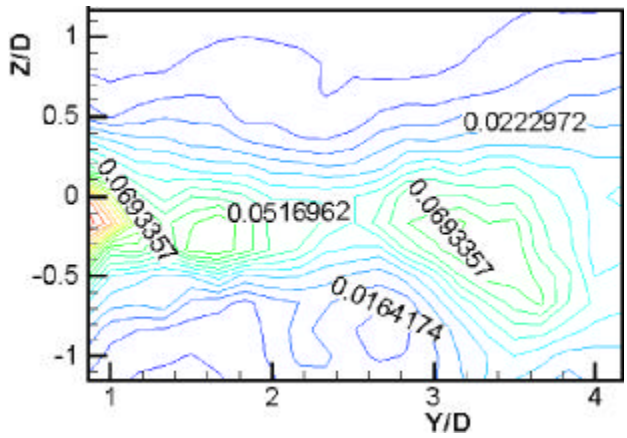


(h) X = 0.667D



(i) X = 1.000D

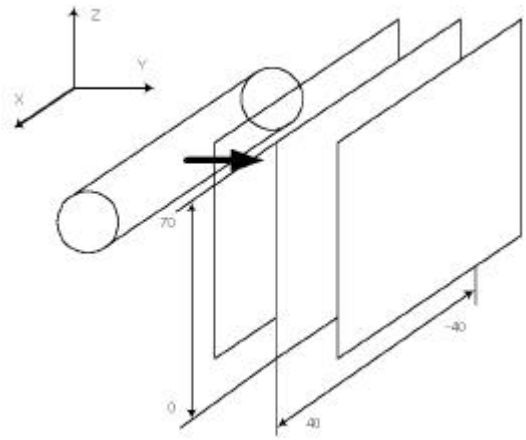
Fig. 5.18 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)



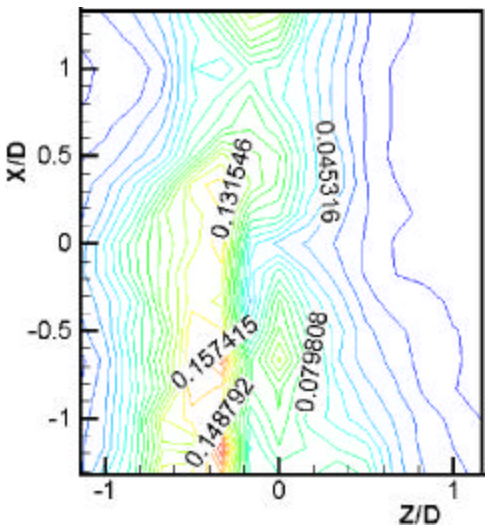
(j) X = 1.333D

Fig. 5.18 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

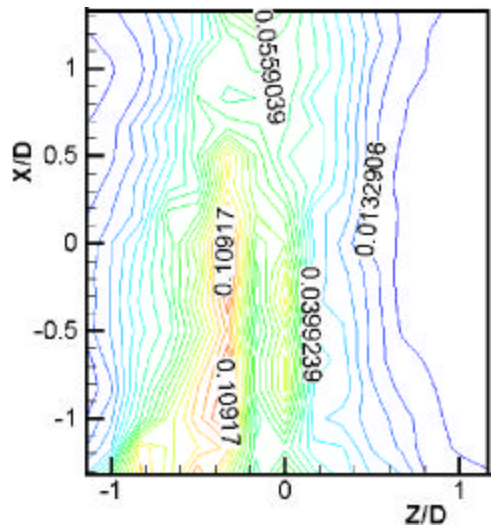
(continued)



(a) Measuring region



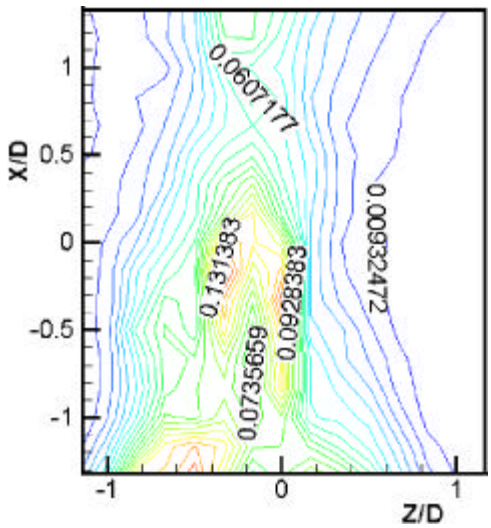
(b) Y = 0.833D



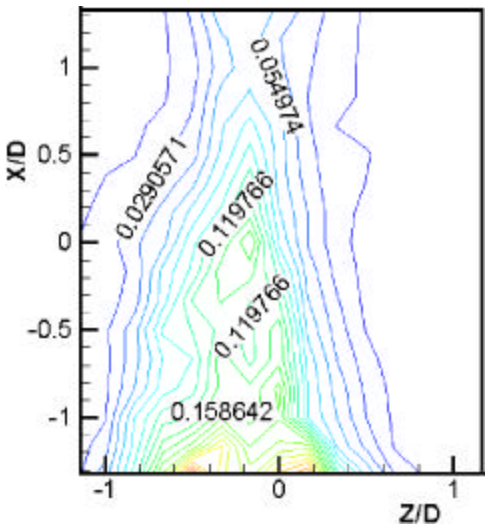
(c) Y = 1.167D

Fig. 5.19 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

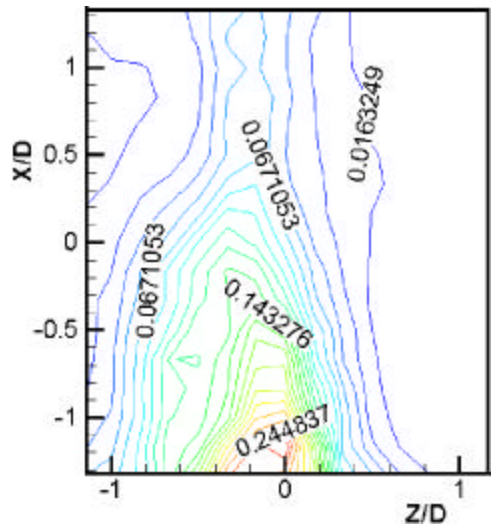
(continued)



(d) Y = 1.500D



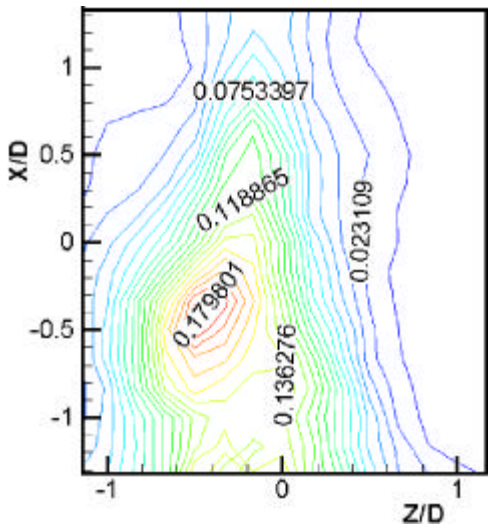
(e) Y = 1.833D



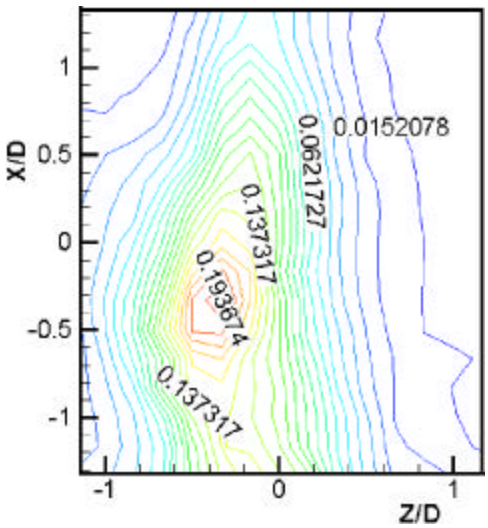
(f) Y = 2.167D

Fig. 5.19 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

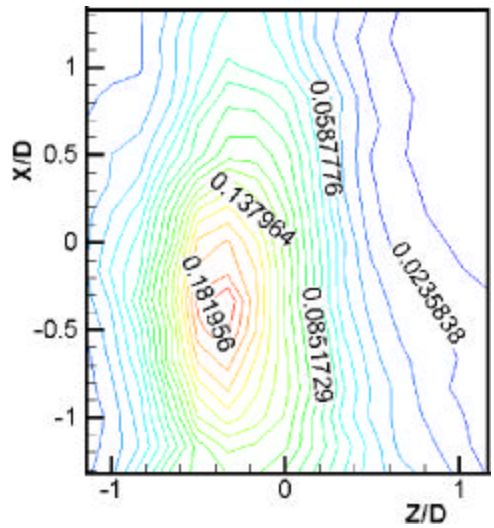
(continued)



(g) Y = 2.500D



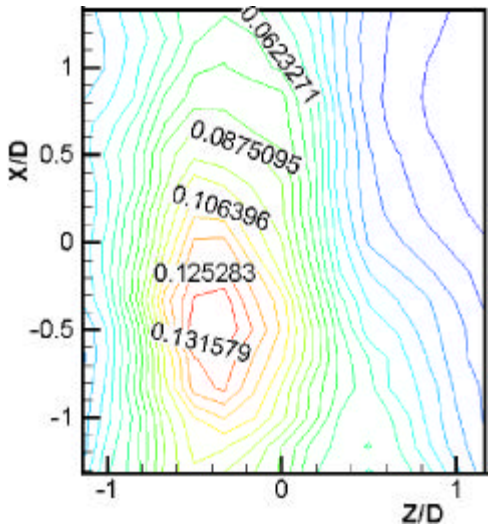
(h) Y = 2.833D



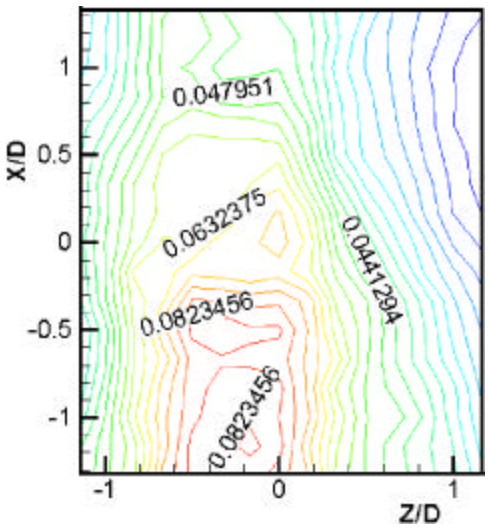
(i) Y = 3.167D

Fig. 5.19 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

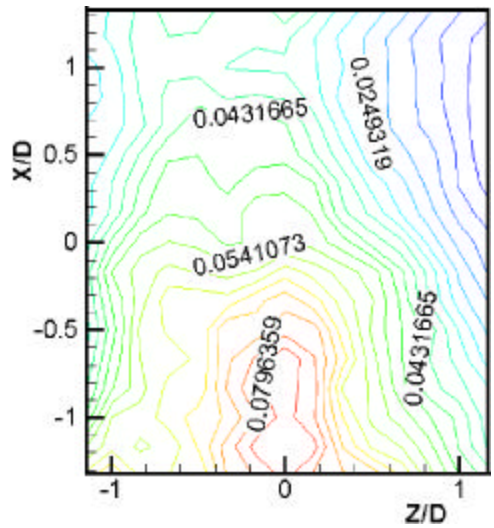
(continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

Fig. 5.19 Turbulence kinetic energy distribution ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

(continued)

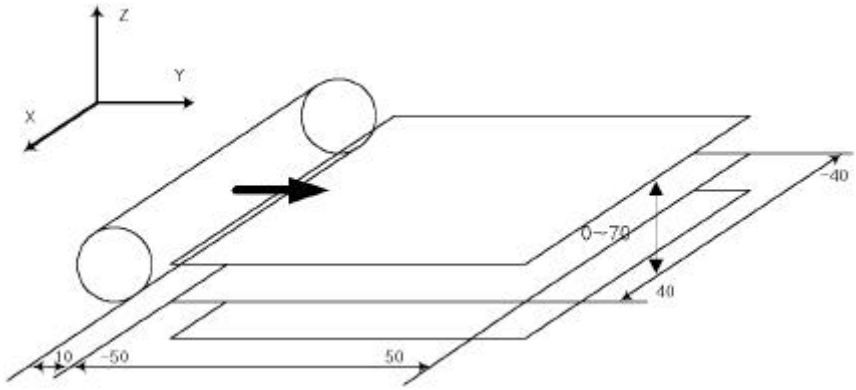
5.4 각 단면에서의 레이놀즈 응력 분포

Fig. 5.20 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 레이놀즈 응력 (u'v'성분)의 분포를 보이고 있다. 그림에서 Y=2.500D인 지점은 원주 중심으로부터 원주 직경을 D라 할 때 2.500D의 위치를 말하며 X=0.000D, Z=0.000D인 지점은 원주의 중심선상에 있음을 의미한다.

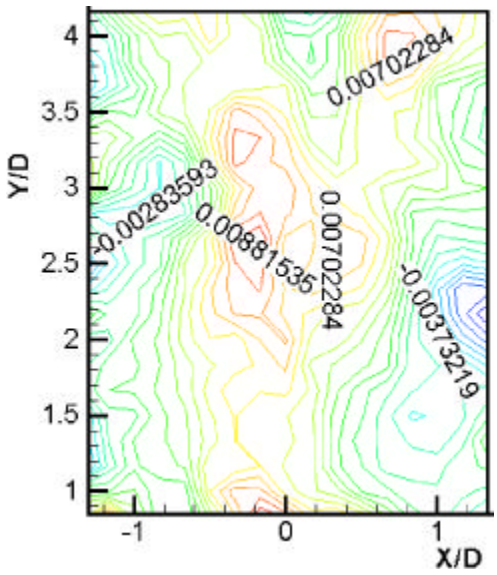
Fig. 5.20 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 레이놀즈 응력 분포(u'v'성분)를 보이고 있다. X=-0.667D, Y=2.000D, Z=-0.167D부근에서 강한 응력 분포를 보이고 있다. 또한 상부에 반대방향의 강한 응력 분포를 보이고 있다. 이 단면을 기준으로 sweeping(단면 반대쪽으로 들어감) 또는 ejection(단면 앞쪽으로 나옴)의 일종으로 볼 수 있다. 즉, vortex filament 의 형태로 되어 하류로 수송되어 감을 추론할 수 있다.

Fig. 5.21은 그림에서 보이는 바와 같이 Y-Z단면의 레이놀즈 응력(u'v'성분)분포를 보이고 있다. 이들 그림들로부터도 와들이 3차원적으로 특징적인 곳에서 운동량교환을 진행시키고 있음을 추론할 수 있다.

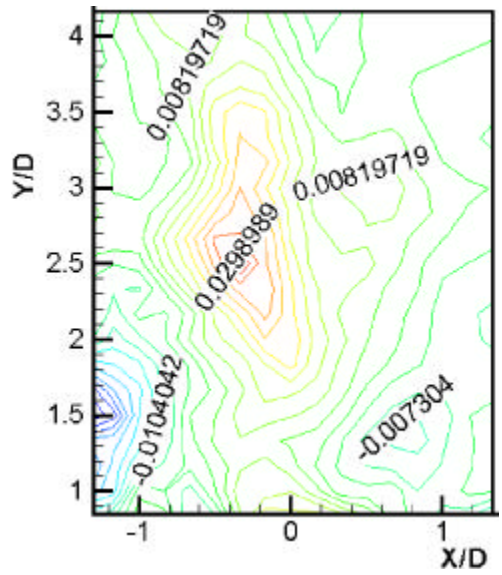
Fig. 5.22는 X-Z plane이 원주근접 후류측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 레이놀즈 응력(u'v'성분)를 보이고 있다. 이들 그림들로부터도 vortex가 3차원적 구조를 가지고 있어서 vortex filament 형으로 유지하면서, 와들이 특징적인 곳에서 운동량 교환을 하고 있음을 추론할 수 있다.



(a) Measuring region

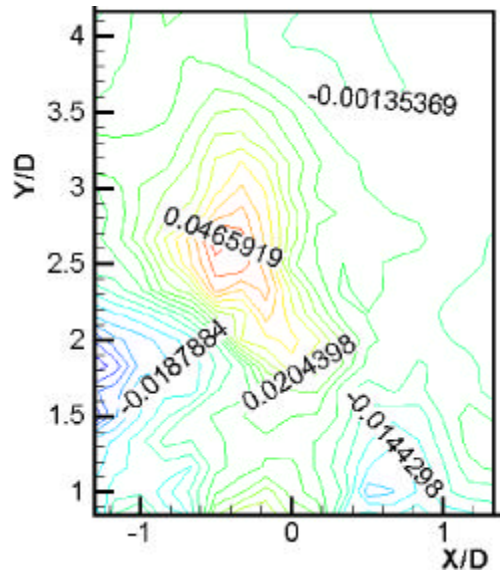


(b) Z = - 1.167D

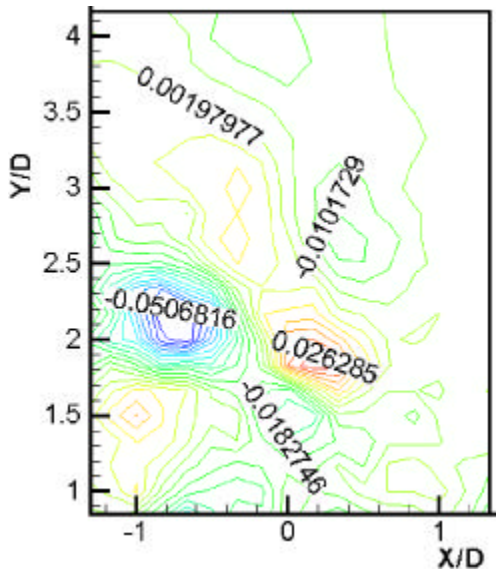


(c) Z = - 0.833D

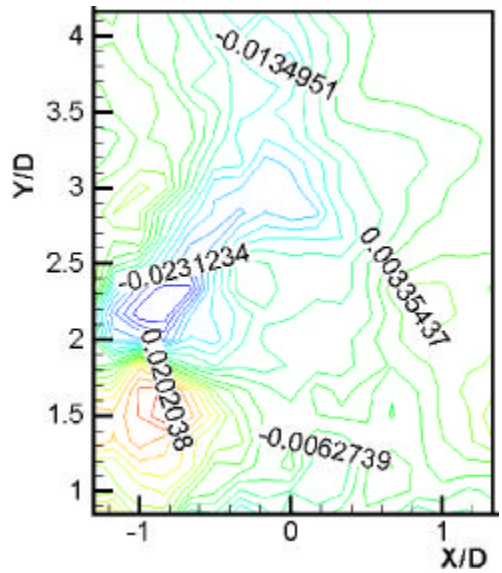
Fig. 5.20 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(d) Z = - 0.500D

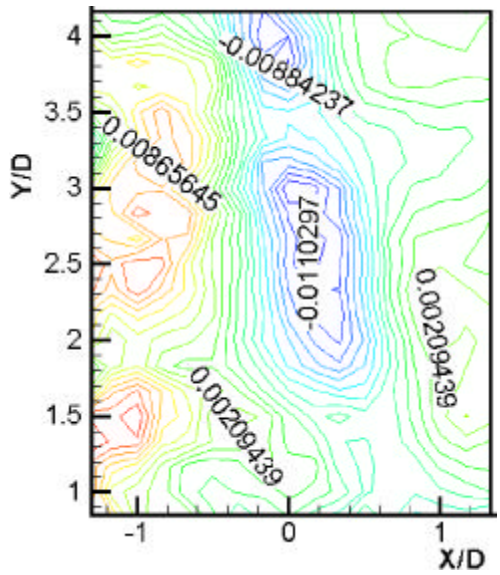


(e) Z = - 0.167D

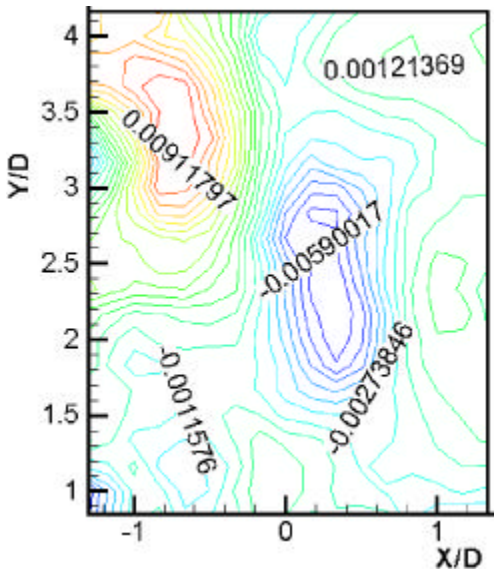


(f) Z = 0.167D

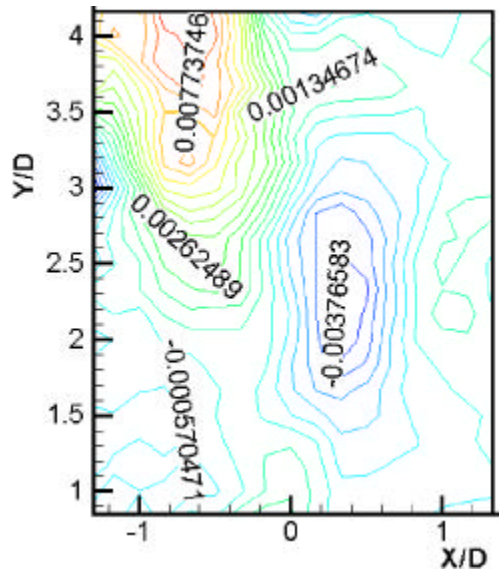
Fig. 5.20 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(g) Z = 0.500D

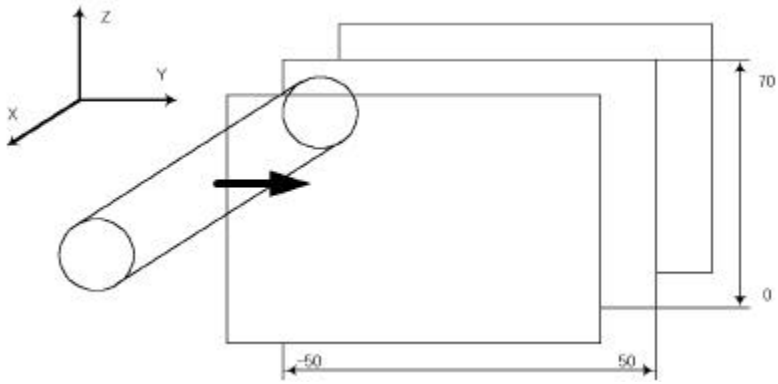


(h) Z = 0.833D

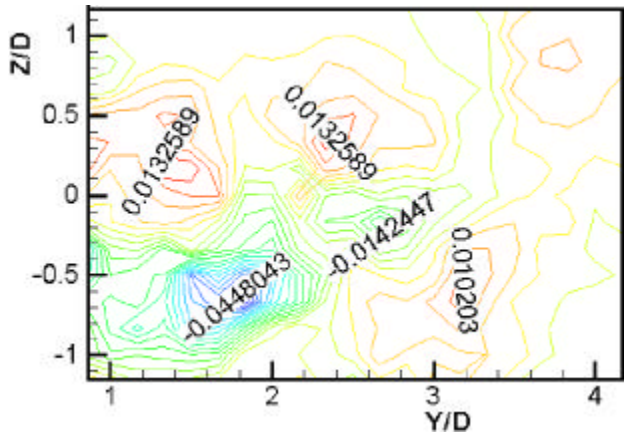


(i) Z = 1.167D

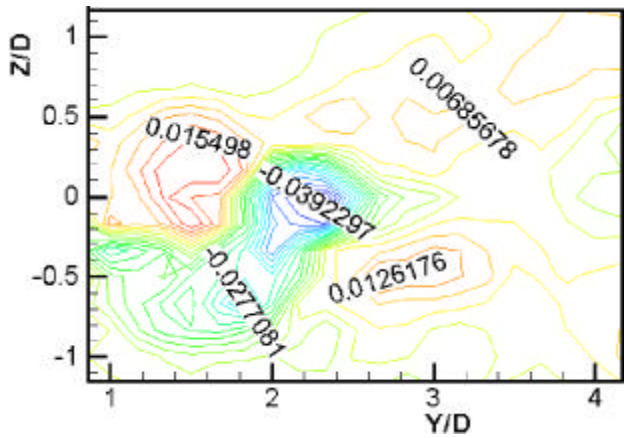
Fig. 5.20 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(a) Measuring region

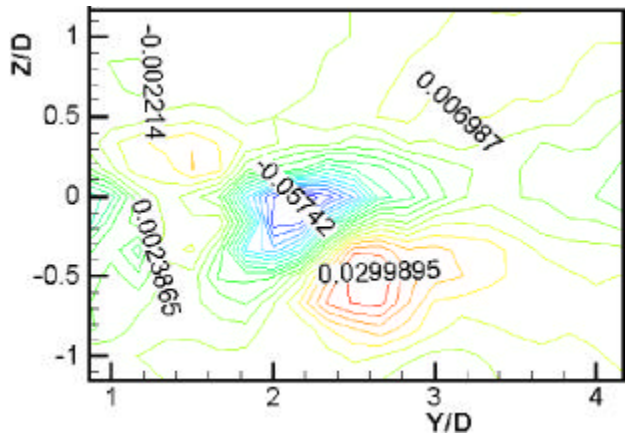


(b) X = - 1.333D

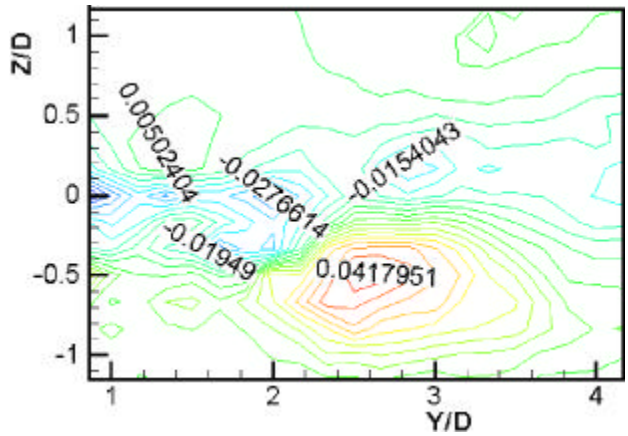


(c) X = - 1.000D

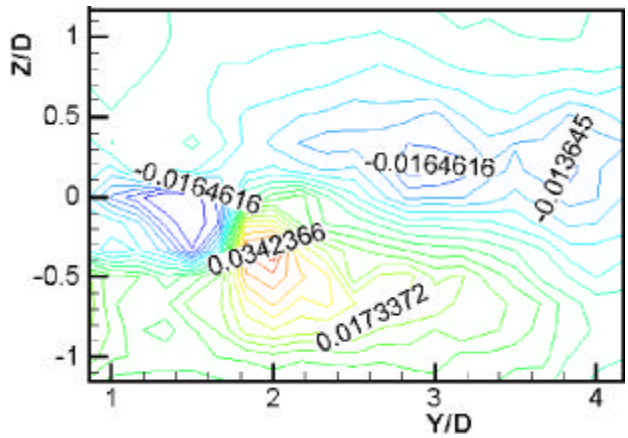
Fig. 5.21 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(d) X = - 0.667D

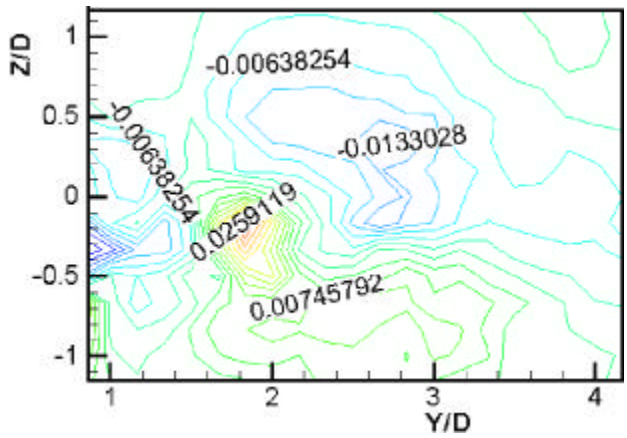


(e) X = - 0.333D

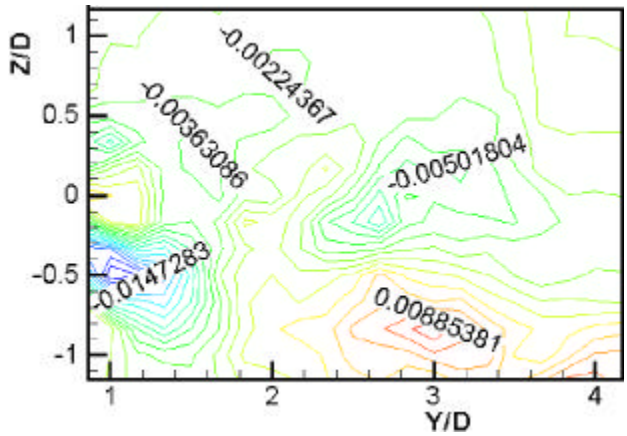


(f) X = 0.000D

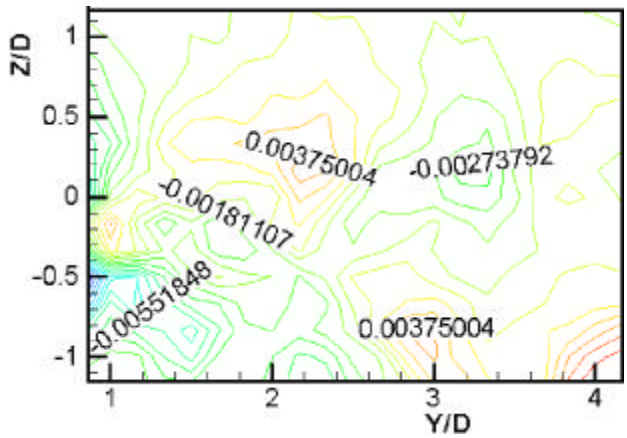
Fig. 5.21 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(g) X = 0.333D

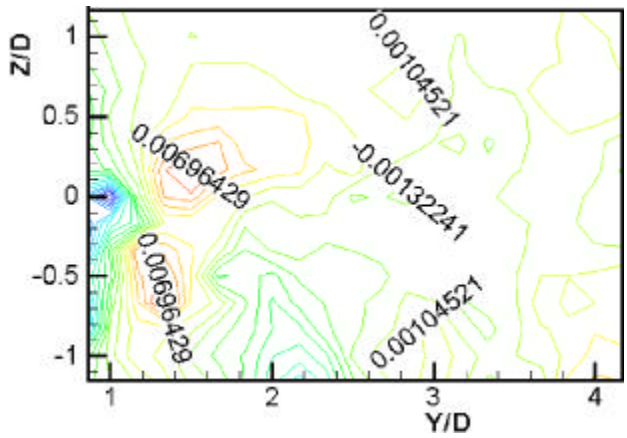


(h) X = 0.667D



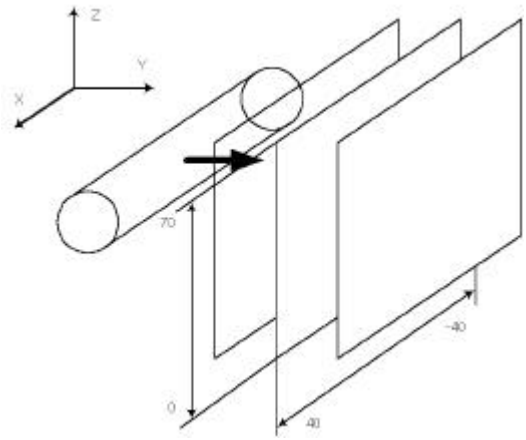
(i) X = 1.000D

Fig. 5.21 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)

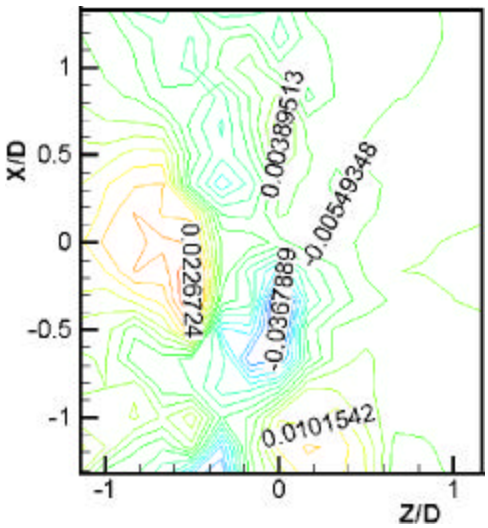


(j) X = 1.333D

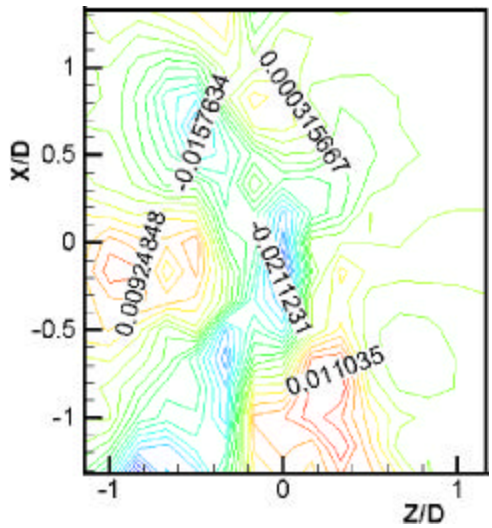
Fig. 5.21 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(a) Measuring region

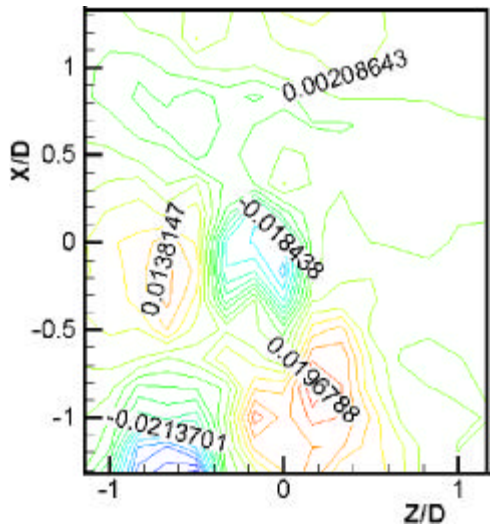


(b) Y = 0.833D

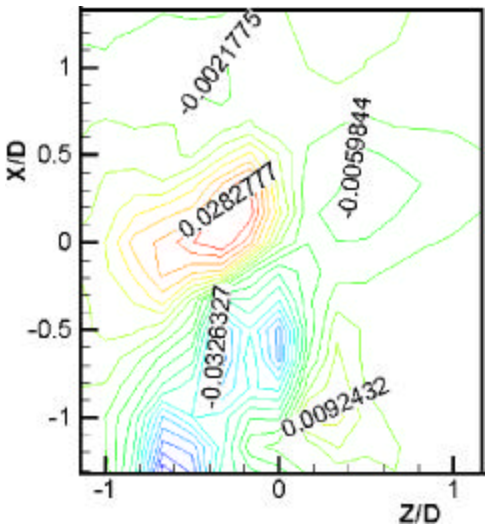


(c) Y = 1.167D

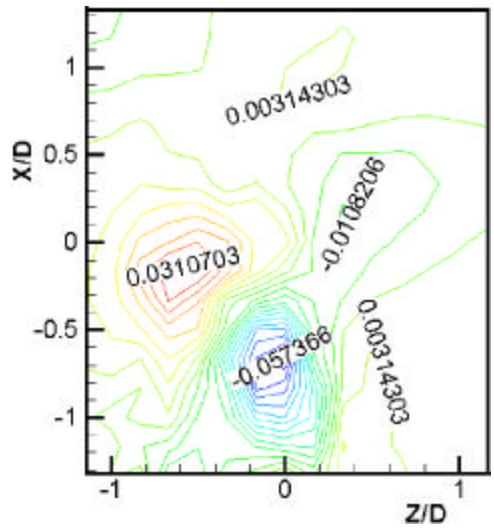
Fig. 5.22 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(d) Y = 1.500D

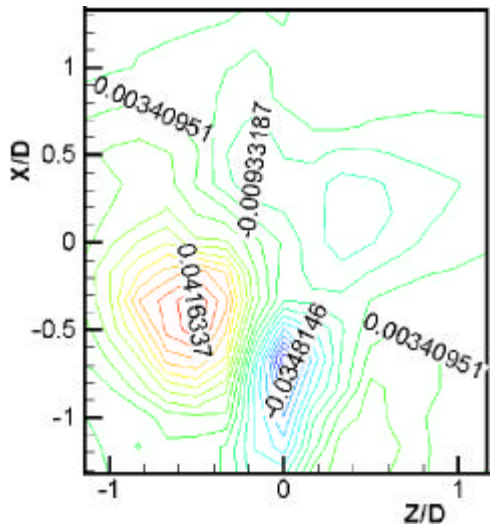


(e) Y = 1.833D

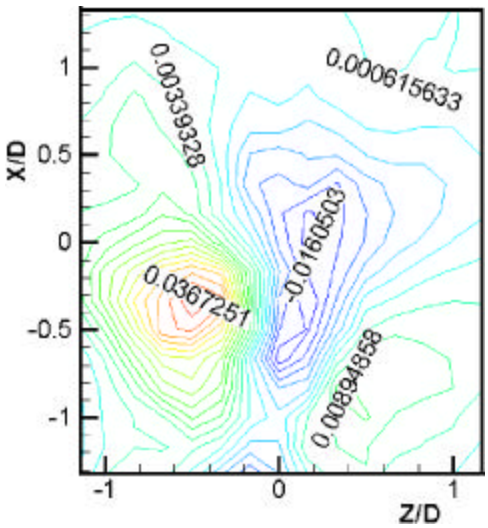


(f) Y = 2.167D

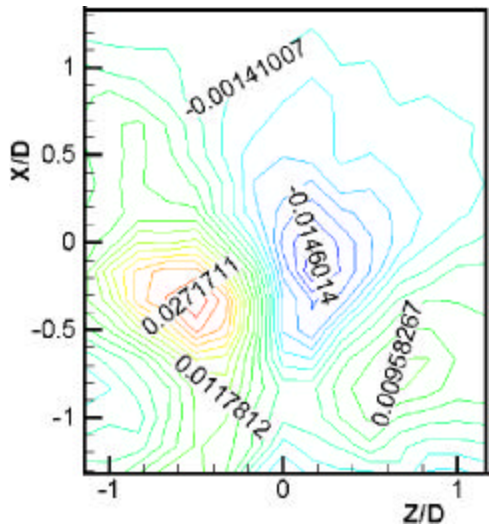
Fig. 5.22 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'} / U_0^2$) (continued)



(g) Y = 2.500D

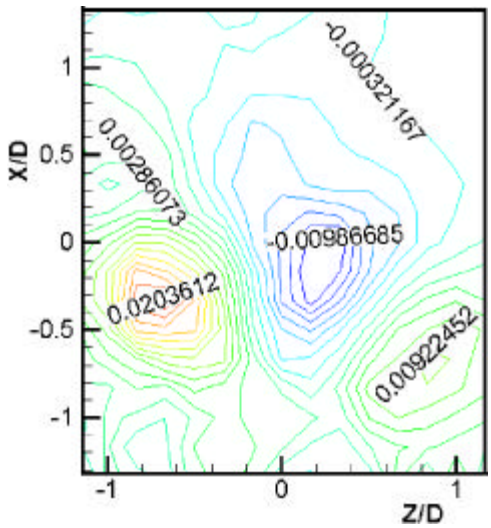


(h) Y = 2.833D

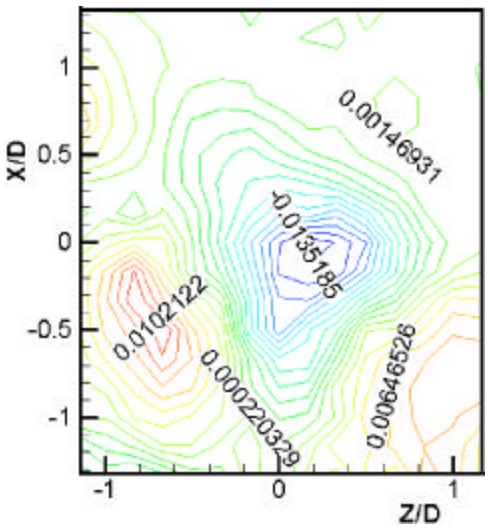


(i) Y = 3.167D

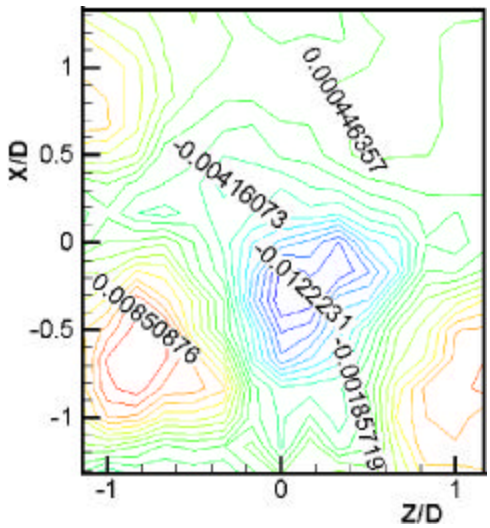
Fig. 5.22 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$) (continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

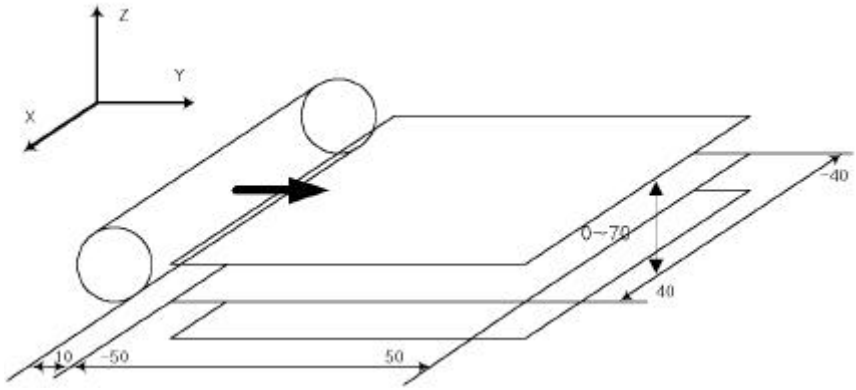
Fig. 5.22 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'}/U_0^2$)

Fig. 5.23 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 레이놀즈 응력 (v'w'성분)의 분포를 보이고 있다.

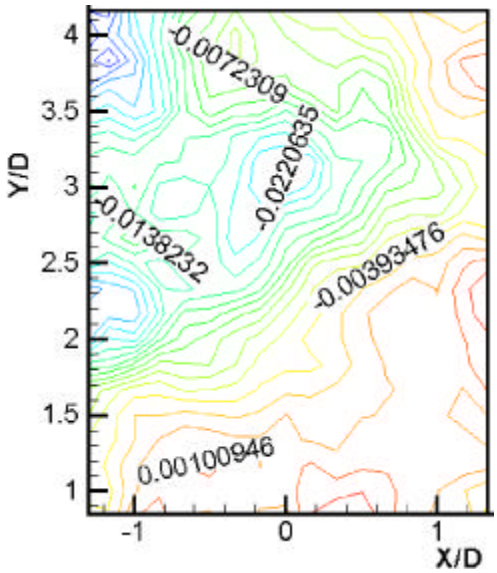
Fig. 5.23 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 레이놀즈 응력 분포(v'w'성분)를 보이고 있다. X=-0.500D, Y=2.500D, Z=-0.500D부근에서 강한 응력 분포를 보이고 있다. Z=0.167D이상에서부터는 secondary vortex가 서로 반대 방향으로 두 개 나열되어 3차원적 구조를 이루고 있음을 의미하는 응력 분포를 보이고 있다.

Fig. 5.24는 그림에서 보이는 바와 같이 Y-Z단면의 레이놀즈 응력(v'w'성분) 분포를 보이고 있다. X=0.000D에 가까울수록 즉, 원주의 중앙단면에 가까이 갈수록 레이놀즈 응력의 분포가 Z=0.000D를 기점으로 상하 대칭을 이루면서 반대방향인 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, X축 방향으로도 X=0.000D을 기준으로 이 응력의 분포가 전후 서로 유사하게 대칭을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 중앙부분에서 spanwise방향의 운동량교환이 강하게 발생하고 있음이 추론된다.

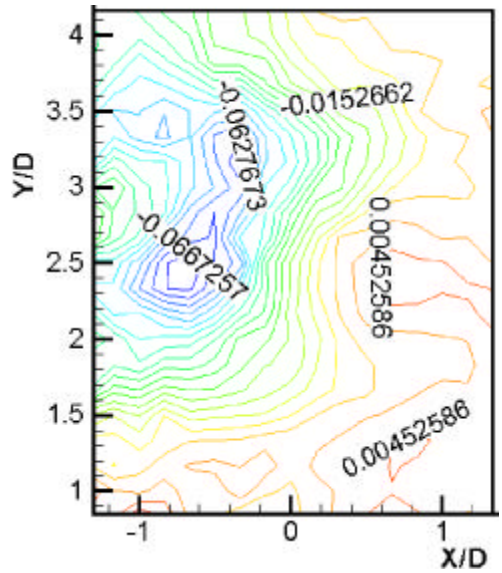
Fig. 3.25는 X-Z plane이 원주근접 후류측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 레이놀즈 응력(v'w'성분)를 보이고 있다. X=-0.500 & X=0.500D, Y=2.833D, Z=-0.500D & Z=0.167D에서 서로 반대 방향의 레이놀즈 응력을 보이고 있는데 이는 secondary vortex가 뚜렷하게 나타나 있는 것으로 볼 수 있으며 그 간격도 D와 동일한 30정도이다. 이는 Brede 등이 제시한 결과와 일치하고 있으므로 좋은 결과를 얻었다고 볼 수 있다.



(a) Measuring region

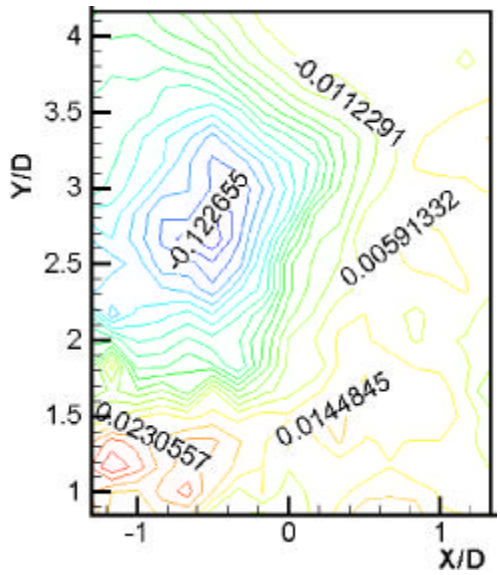


(b) Z = - 1.167D

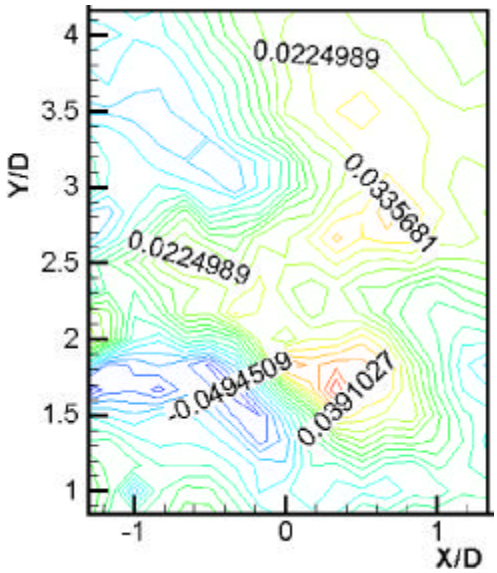


(c) Z = - 0.833D

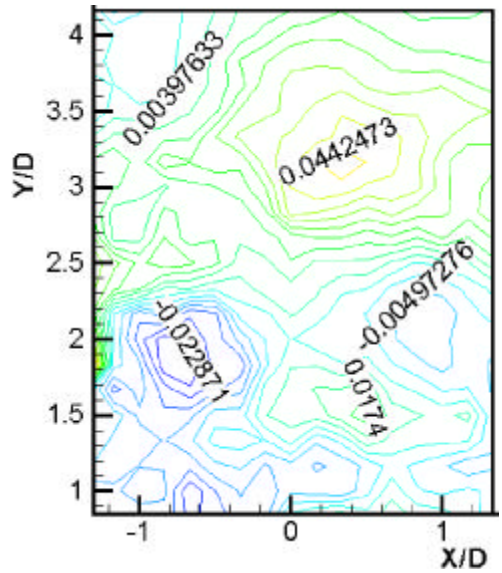
Fig. 5.23 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(d) Z = - 0.500D

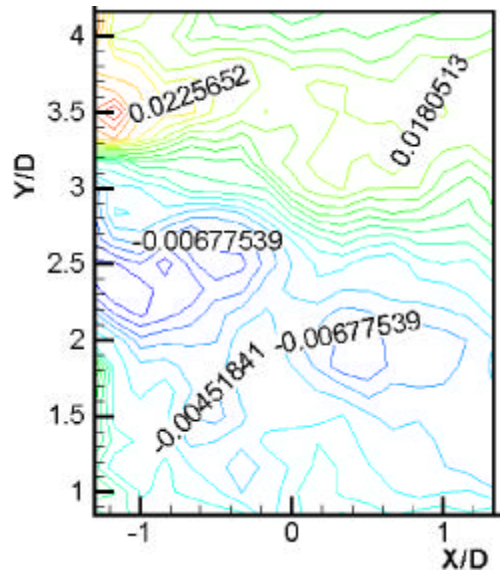


(e) Z = - 0.167D

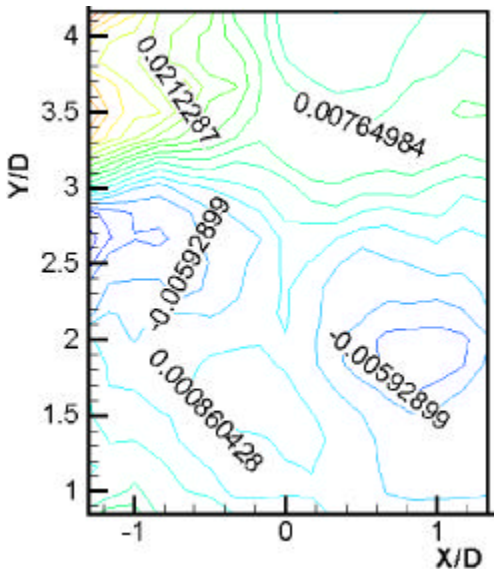


(f) Z = 0.167D

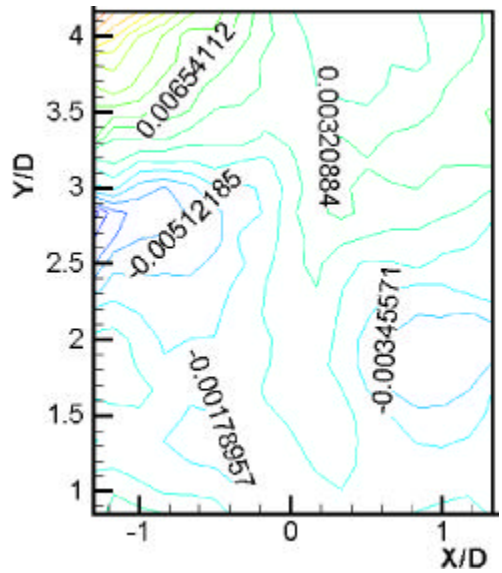
Fig. 5.23 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(g) z = 0.500D

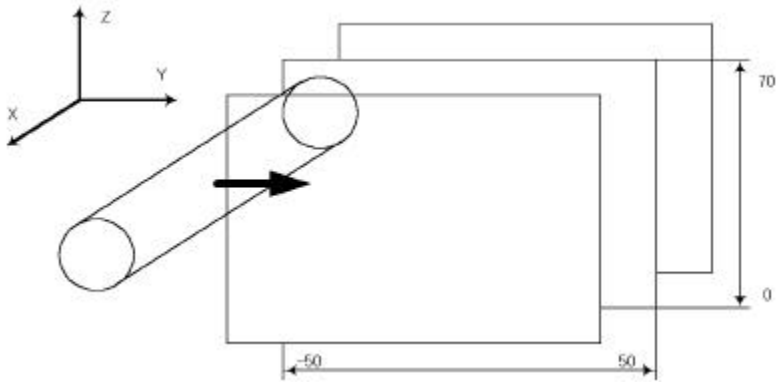


(h) Z = 0.833D

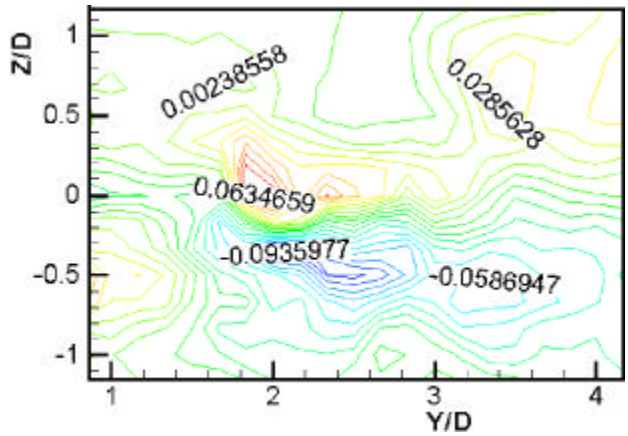


(i) Z = 1.167D

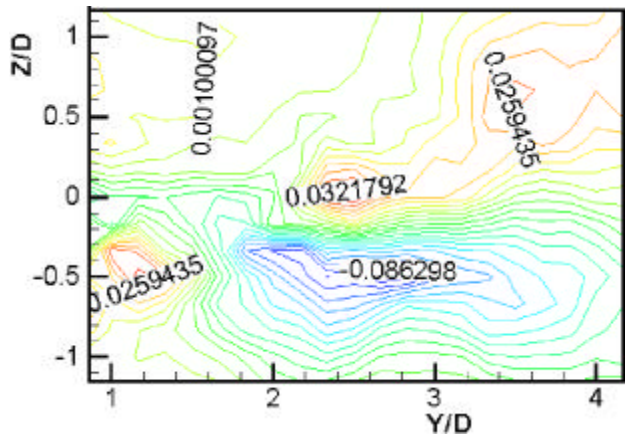
Fig. 5.23 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(a) Measuring region

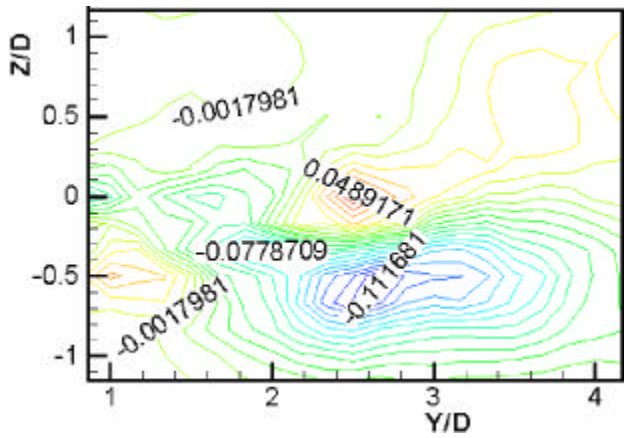


(b) X = - 1.333D

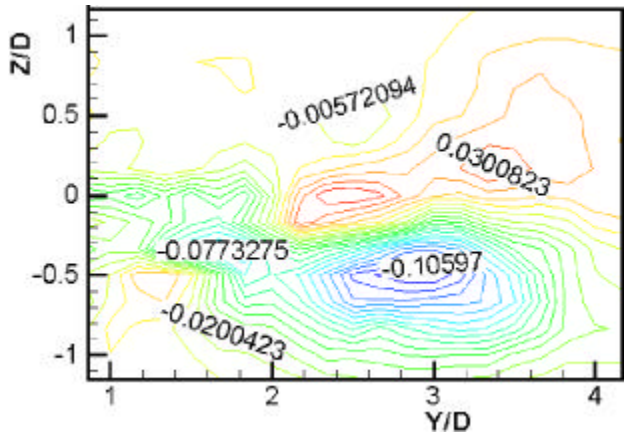


(c) X = - 1.000D

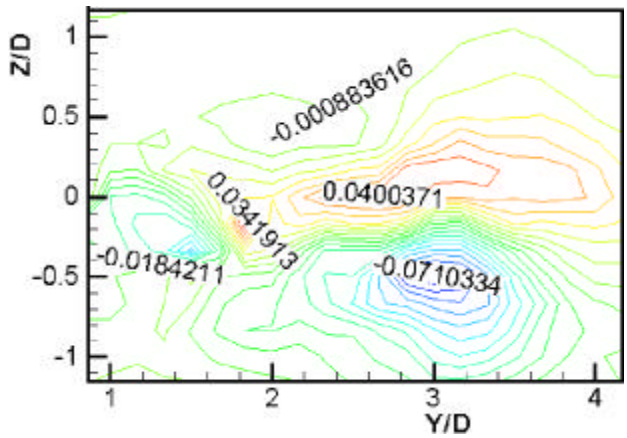
Fig. 5.24 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(d) X = - 0.667D

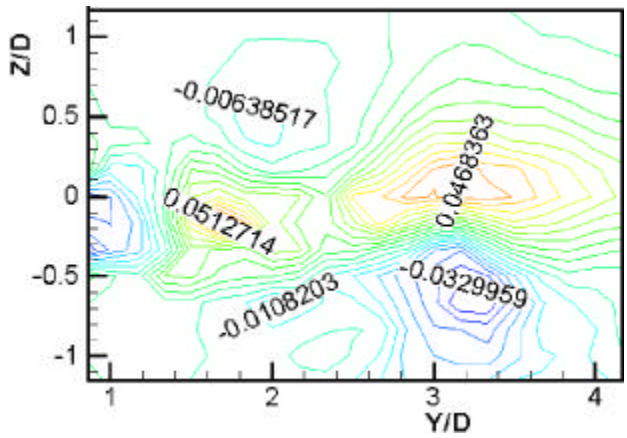


(e) X = - 0.333D

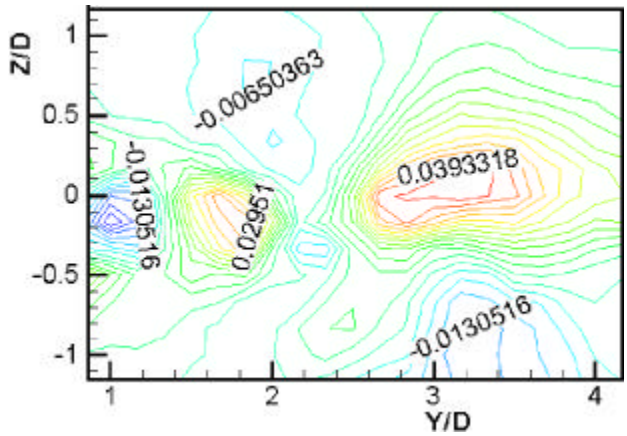


(f) X = 0.000D

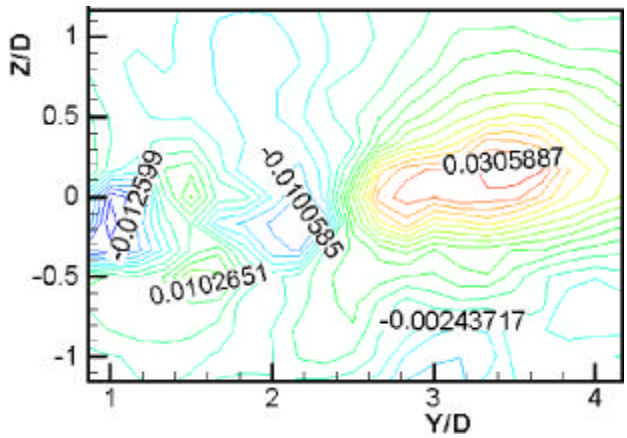
Fig. 5.24 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(g) X = 0.333D

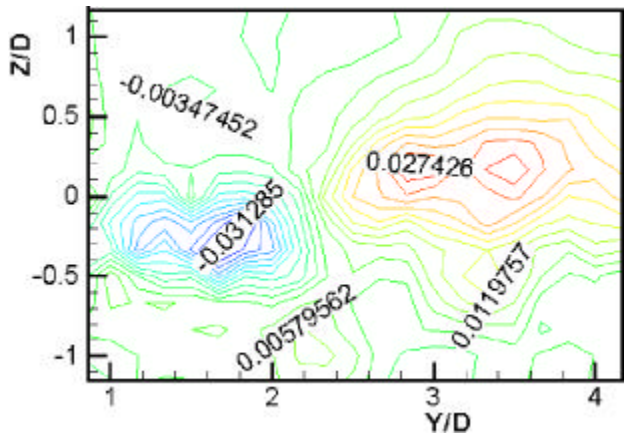


(h) X = 0.667D



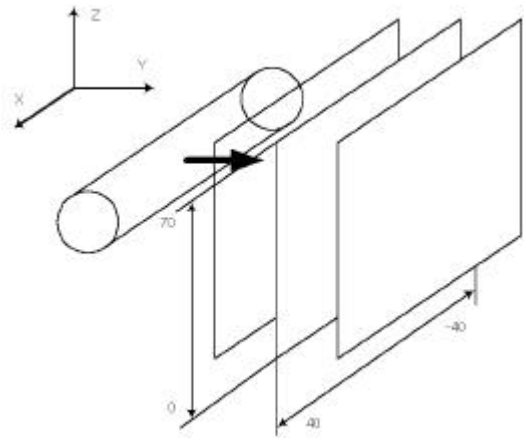
(i) X = 1.000D

Fig. 5.24 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)

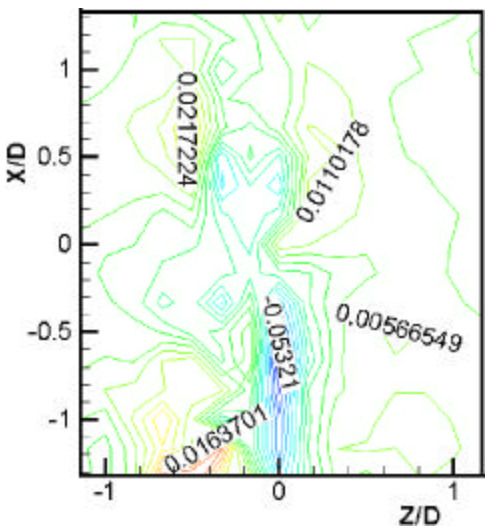


(j) X = 1.333D

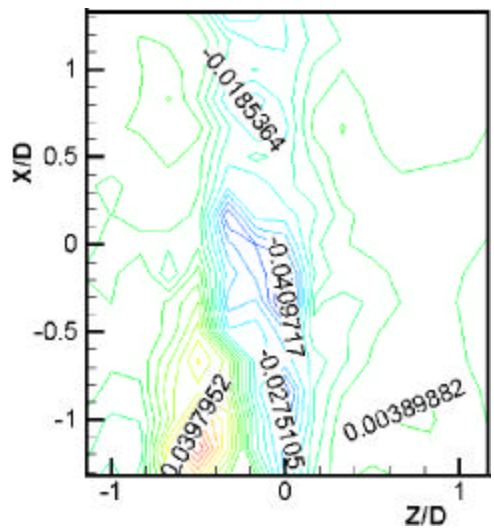
Fig. 5.24 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(a) Measuring region

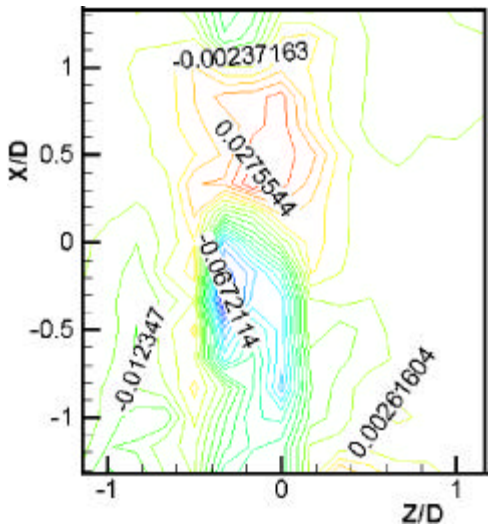


(b) Y = 0.833D

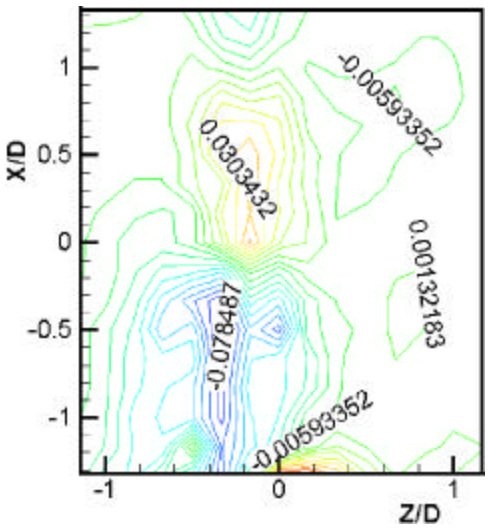


(c) Y = 1.167D

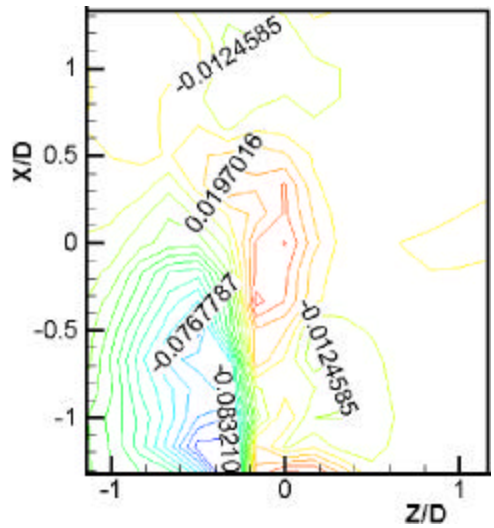
Fig. 5.25 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(d) Y = 1.500D

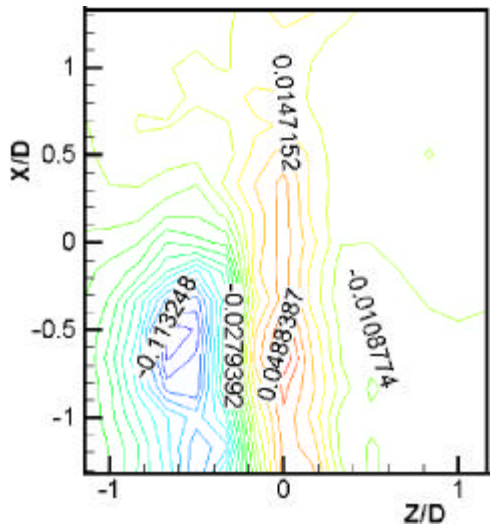


(e) Y = 1.833D

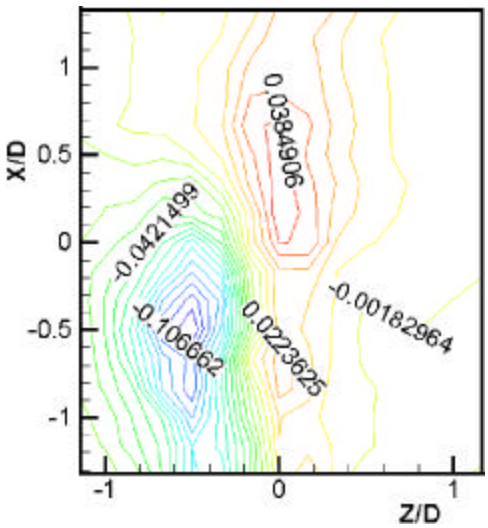


(f) Y = 2.167D

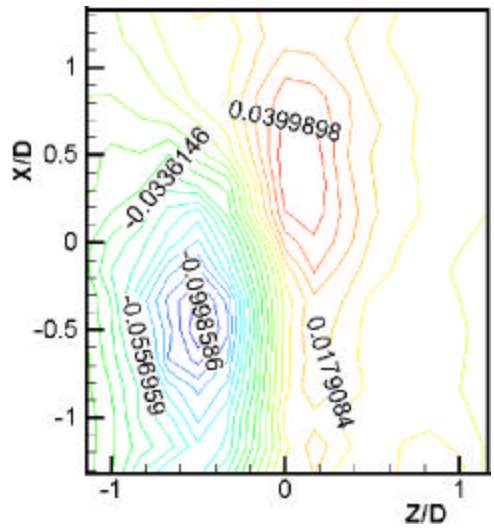
Fig. 5.25 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(g) Y = 2.500D

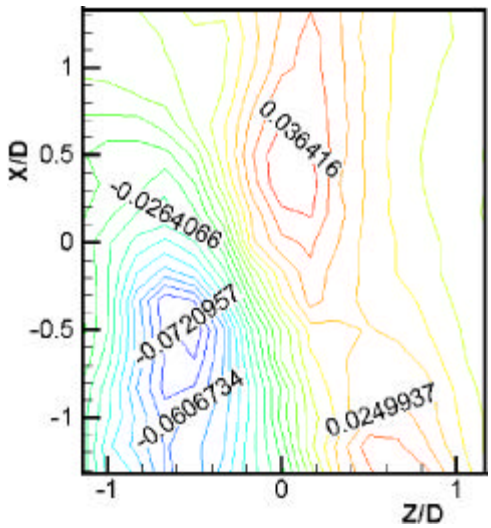


(h) Y = 2.833D

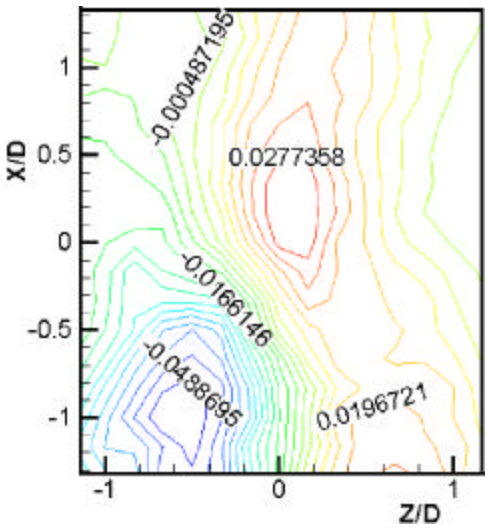


(i) Y = 3.167D

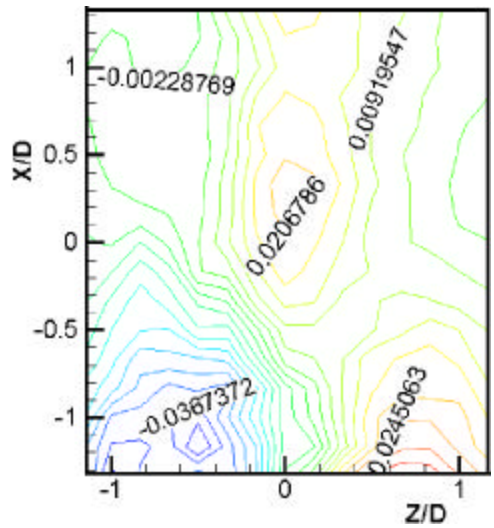
Fig. 5.25 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$) (continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

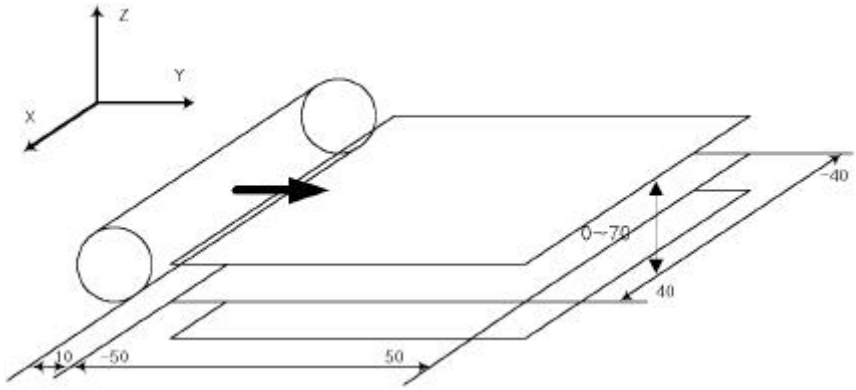
Fig. 5.25 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'}/U_0^2$)

Fig. 5.26 (a)는 그림에서 보이는 바와 같은 방향에 있어서의 레이놀즈 응력 (w'u'성분)의 분포를 보이고 있다.

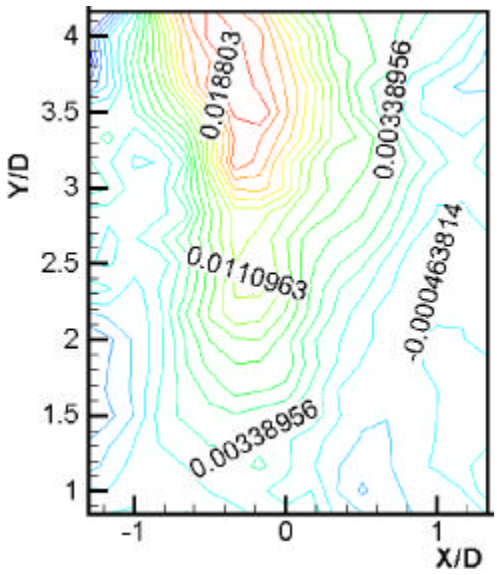
Fig. 5.26 (b) (i)는 X-Y plane이 원주 하부로부터 Z방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 레이놀즈 응력 분포(w'u'성분)를 보이고 있다. X=-0.333D, Y=2.800D, Z=-0.167D부근에서 강한 응력 분포를 보이고 있으며 X=-0.333D부근에서 강한 응력 Y방향으로 3차원적 구조를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5.27은 그림에서 보이는 바와 같이 Y-Z단면의 레이놀즈 응력(w'u'성분) 분포를 보이고 있다. X=-0.667D에서 X=0.333D사이에, 특히 X=-0.333D, Y=3.000D에서 강한 레이놀즈 응력(w'u'성분)의 구배가 존재함을 알 수 있는데 이는 secondary vortex가 서로 X축 상하로 교번으로 발생하는 부분으로 추정할 수 있다 하겠다.

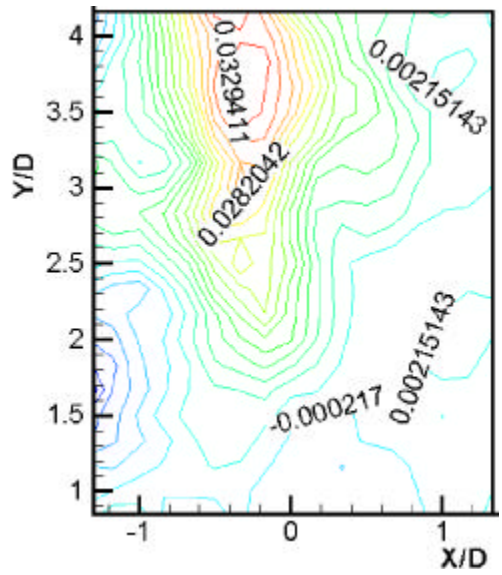
Fig. 5.28는 X-Z plane이 원주근접 후류측에서 Y방향으로 0.333D씩 증가할 때의 단면내의 레이놀즈 응력(w'u'성분)를 보이고 있다. 이들 그림으로부터 알 수 있는 것은 원주를 통과한 와구조가 하류방향으로 흘러가다가 Y=2.500D부근에서 merging이 되고 그 이후로 그 상태로 유지되어 가면서 약해져 가고 있음을 추론할 수 있다.



(a) Measuring region

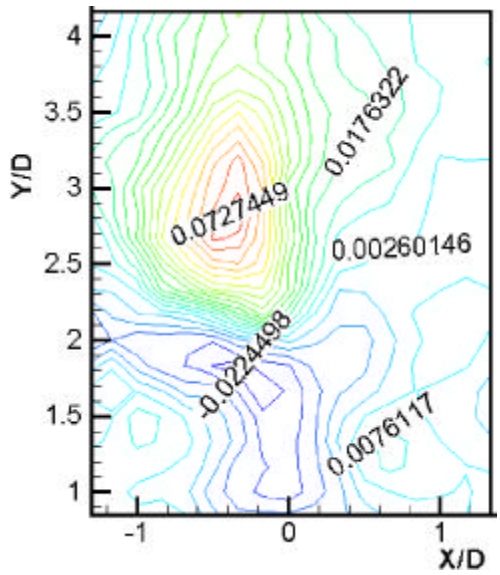


(b) Z = - 1.167D

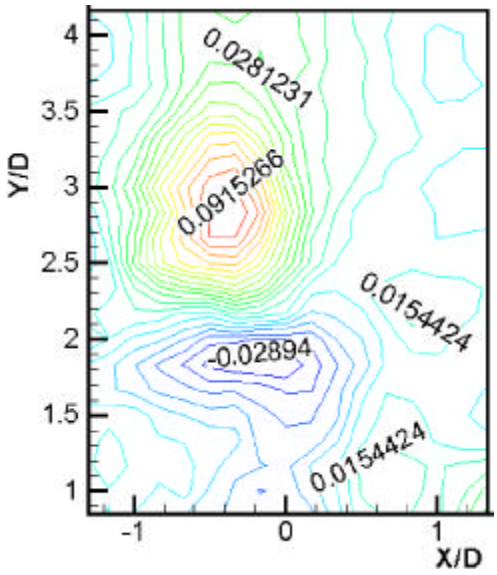


(c) Z = - 0.833D

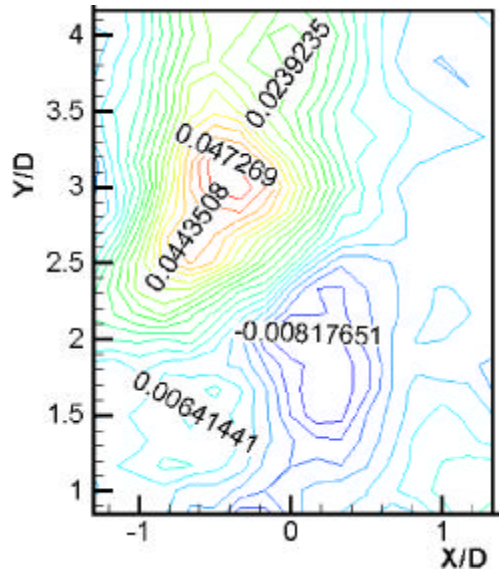
Fig. 5.26 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(d) Z = - 0.500D

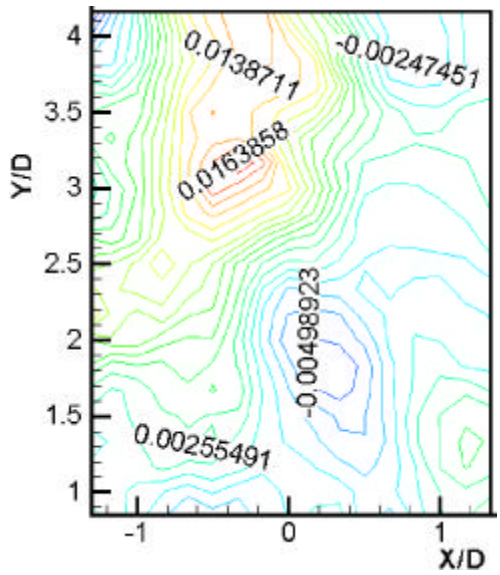


(e) Z = - 0.167D

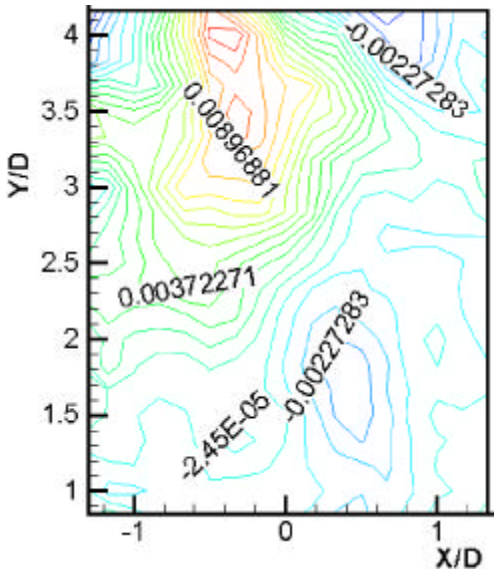


(f) Z = 0.167D

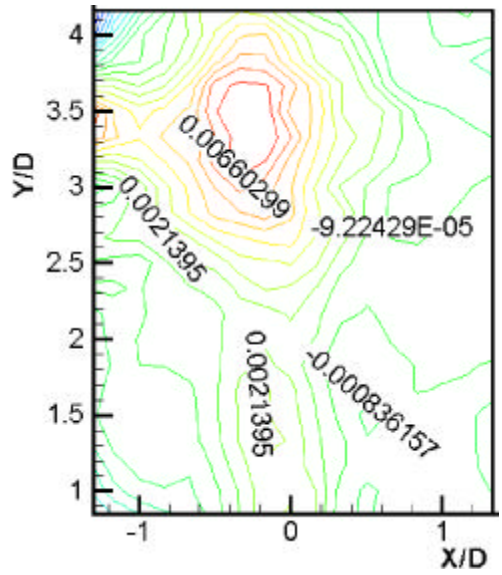
Fig. 5.26 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(g) Z = 0.500D

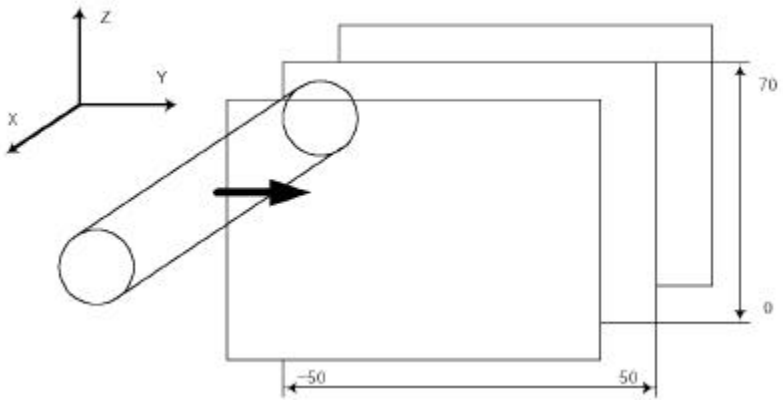


(h) Z = 0.833D

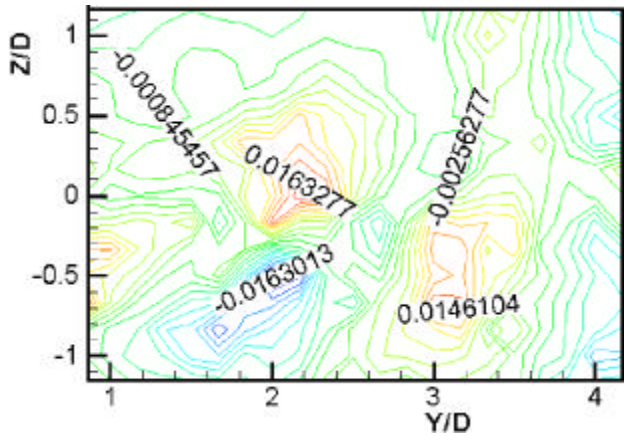


(i) Z = 1.167D

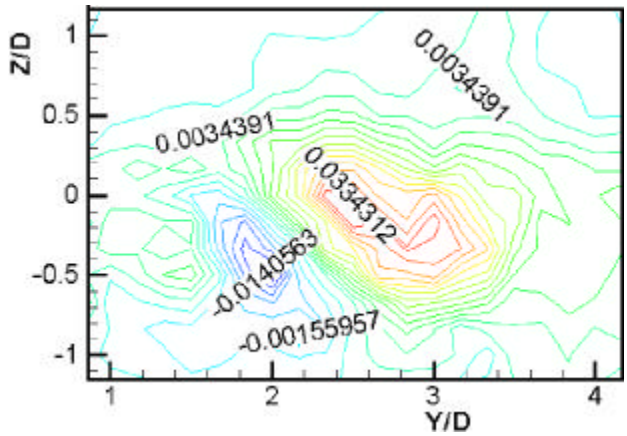
Fig. 5.26 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(a) Measuring region

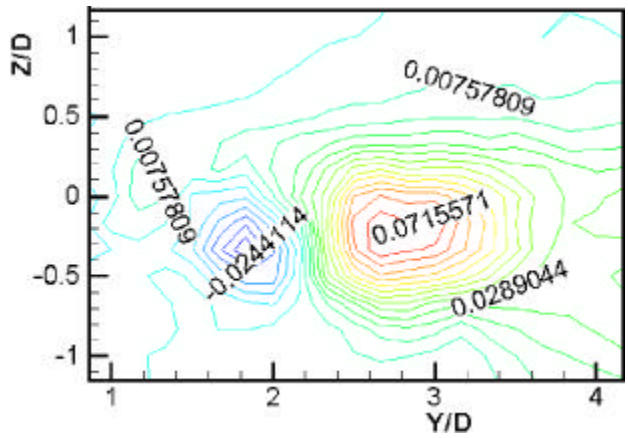


(b) X = - 1.333D

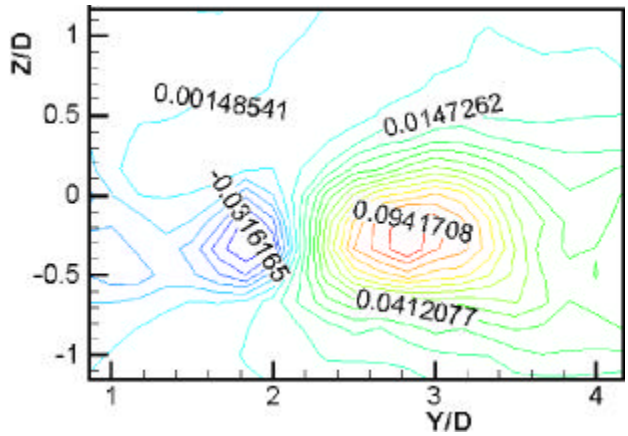


(c) X = - 1.000D

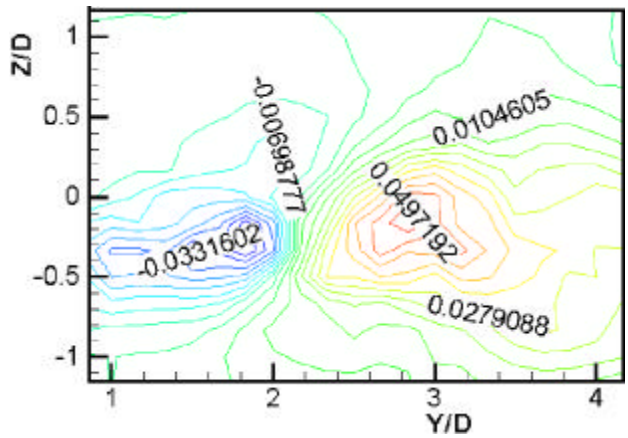
Fig. 5.27 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(d) X = - 0.667D

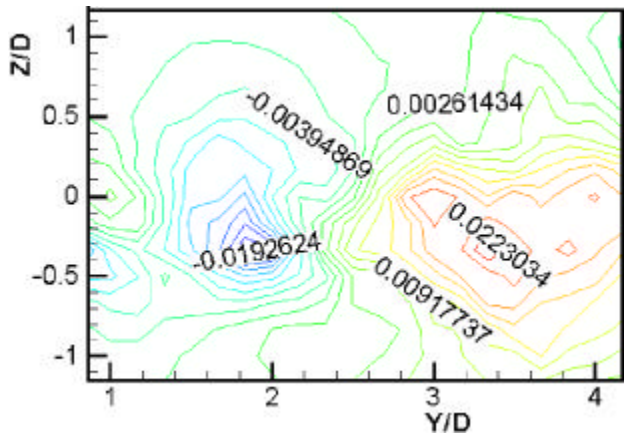


(e) X = - 0.333D

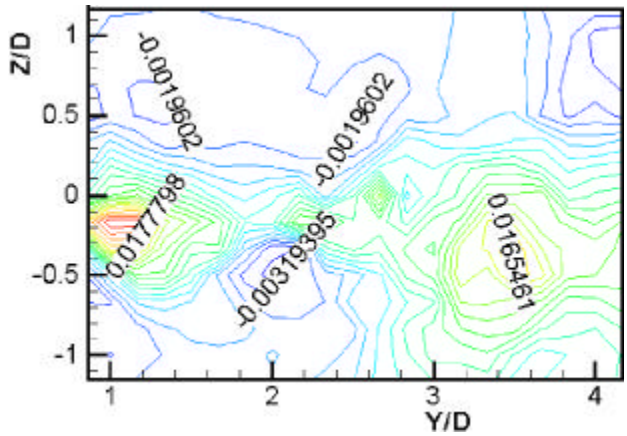


(f) X = 0.000D

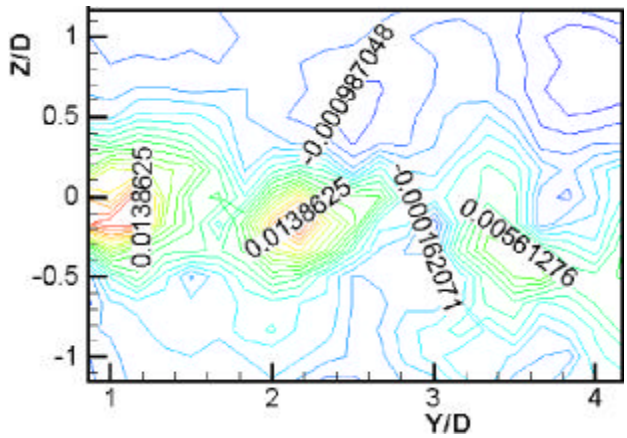
Fig. 5.27 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(g) X = 0.333D

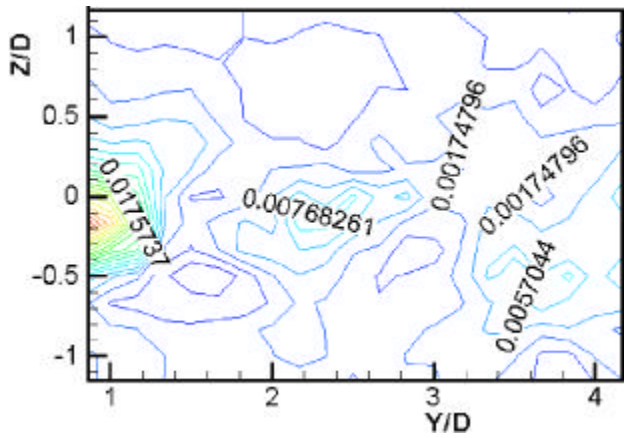


(h) X = 0.667D



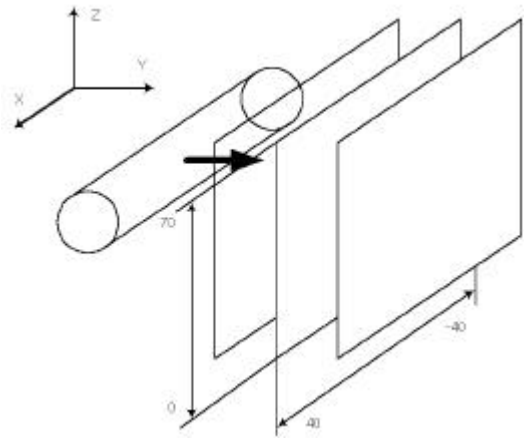
(i) X = 1.000D

Fig. 5.27 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)

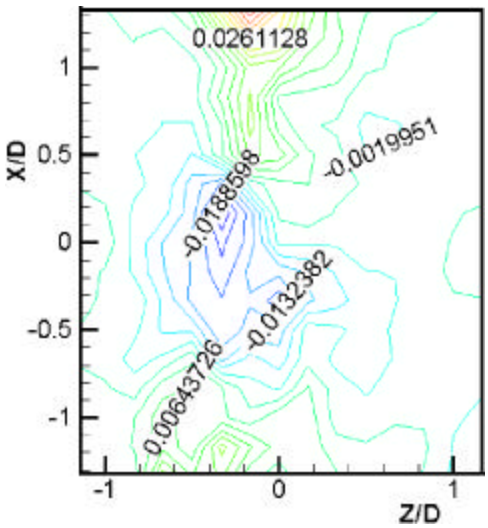


(j) X = 1.333D

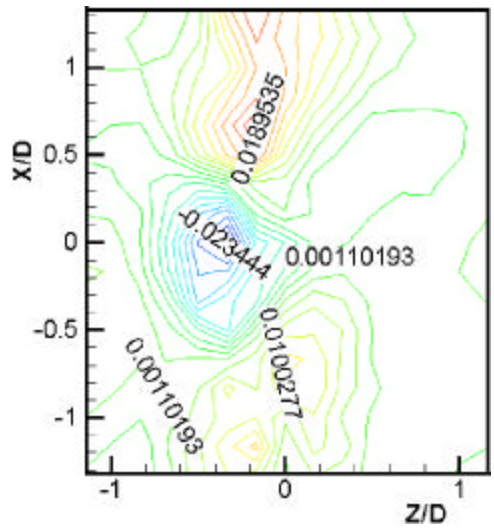
Fig. 5.27 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(a) Measuring region

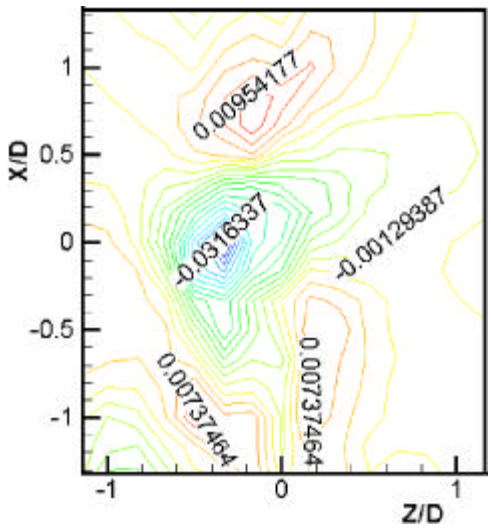


(b) Y = 0.833D

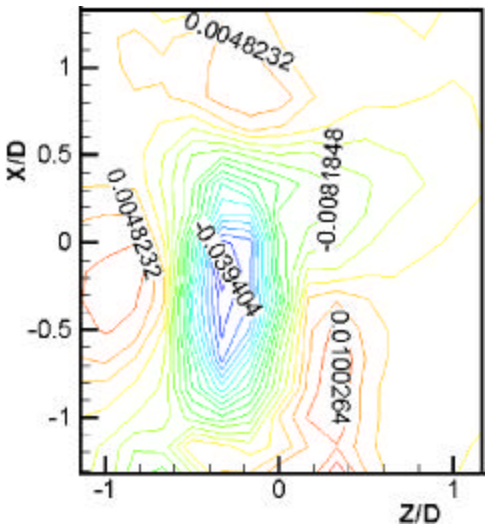


(c) Y = 1.167D

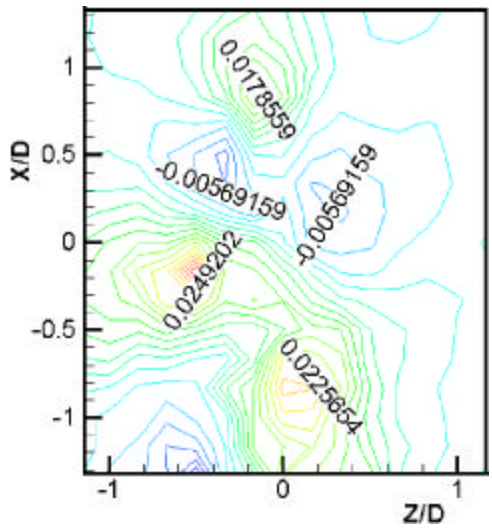
Fig. 5.28 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(d) Y = 1.500D

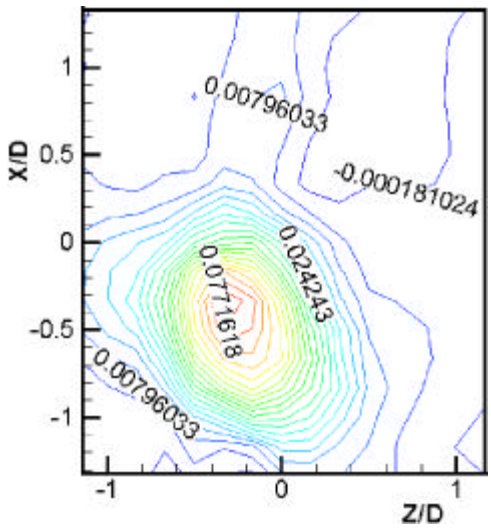


(e) Y = 1.833D

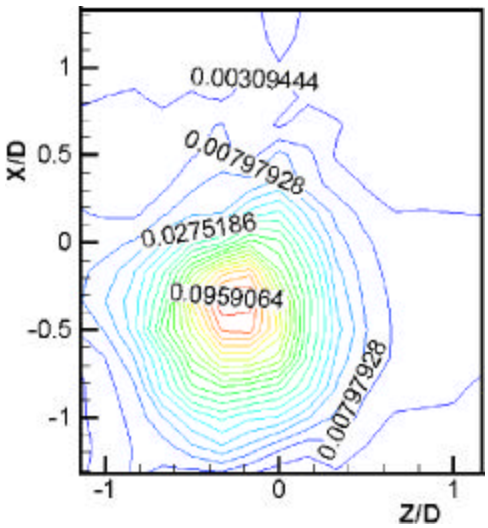


(f) Y = 2.167D

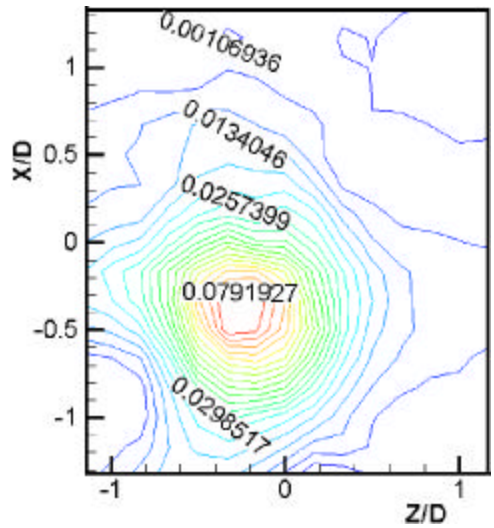
Fig. 5.28 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(g) Y = 2.500D

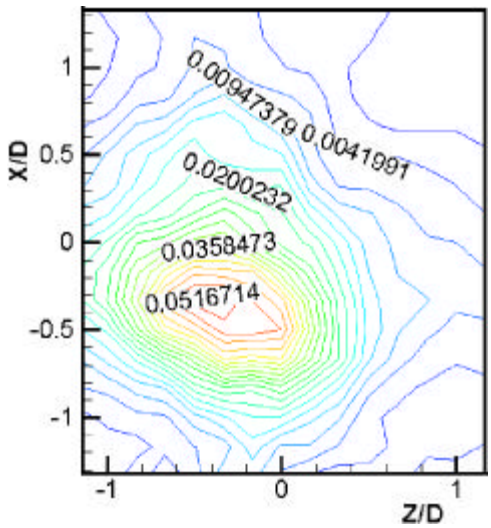


(h) Y = 2.833D

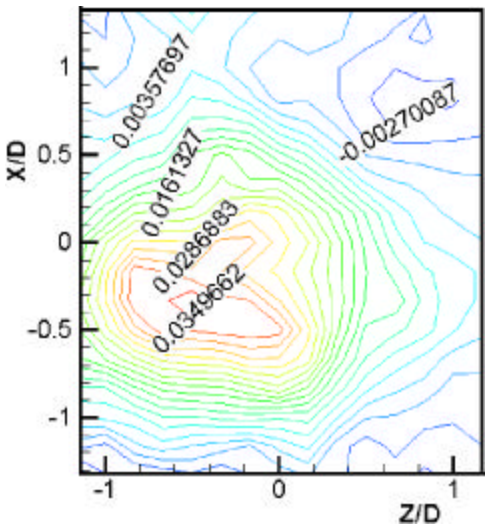


(i) Y = 3.167D

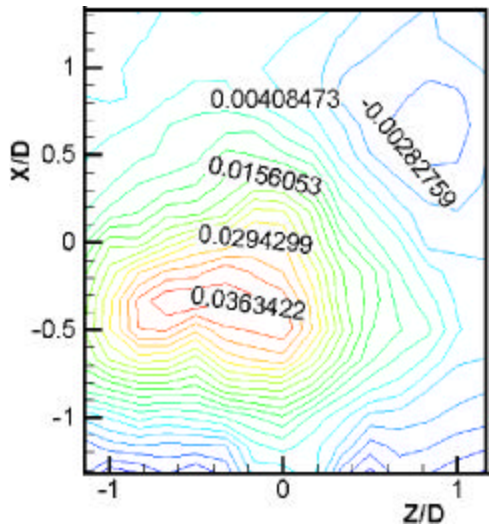
Fig. 5.28 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'}/U_0^2$) (continued)



(j) Y = 3.500D



(k) Y = 3.833D



(l) Y = 4.167D

Fig. 5.28 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'} / U_0^2$)

제 6 장 결 론

원주 근접후류의 유동특성을 파악하기 위하여 유전적 알고리듬 기반의 3차원 PTV 계측법을 구축하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

유전적 알고리듬에 기반을 둔 3차원 PTV계측기법을 원주 뒤에 적용시켜 구축하였다. Visualization Society of Japan에서 제공하는 충돌제트의 LES데이터를 이용한 가상이미지에 구축한 3차원 계측법으로 성능시험을 해 본 결과, 계측영역내의 입자개수가 약 2,000개일 경우 약 65%의 회복률을 보였으며 이는 기존의 Single-Frame 3차원 PTV계측법 보다 양호한 성능을 나타내고 있다.

본 연구에서 구축된 유전적 알고리듬기반 3차원 PTV계측법(3D-GA-PTV)을 원주 근접후류의 유동장 계측에 적용하여 순시속도분포, 평균속도분포, 난류통계량(난류강도, 난류운동에너지, 레이놀즈 응력)를 재순환지점 부근에서 구하여 본 결과 정성적 및 정량적으로 타당한 결과를 얻어냄을 확인함으로써 본 계측법의 유효성을 확인하였다. 기존의 연구결과에 의하면 2차와류의 발생영역은 1.5D 2.0D인데, 본 연구에서 얻어낸 제반 물리량들의 공간적 분포들로부터 2차와류의 발생영역이 45mm 60mm 사이에 근접해 있음을 확인하였다.

2차와류들의 종방향의 간격은 기존의 연구결과에 의하면 원주의 직경길이인 1D정도인데, 본 연구에서는 30mm 정도의 간격이었으며 이는 본 연구에 사용된 원주직경길이인 1D에 해당한다. 또한, 김 등[7]에 의하면 2차와류 발생지점인 1차와류의 재순환 영역 끝지점의 X/D=0.3부근에서 레이놀즈 응력이 아주 큰 것으로 보고하고 있는데 이는 본 계측법으로 계측한 것과 유사한 결과를 보였다. 이는 CFD등의 계산결과에 대한 검증 시 좋은 비교자료가 될 수 있을 뿐만 아니라 이들 제반 난류통계량들은 추후 원주 근접후류의 연구를 위한 방대한 량의 데이터베이스를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

본 계측법으로부터 얻어지는 순시속도벡터의 개수가 1,100개 이상이었으며 이는 Nihino 등이 제시한 난류유동구조의 해명에 있어서 적절한 순시속도벡터 수 700정도를 초과함에 따라 비정상 복잡유동장 난류유동의 구조해명이 가능할 것으로 사료된다.

입자의 겹침문제, 카메라의 해상도문제, 비디오체계의 안정성문제 등을 보완한다면 난류스케일까지 계측할 수 있으며 일회의 측정으로 얻어지는 순시속도벡터의 획득률을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이는 보다 복잡한 유동장의 3차원 유동구조에 대하여 미소스케일까지의 계측 가능성을 시사한다.

참고문헌

1) Roshko A., “On the development of turbulent wakes from vortex streets”, NACA 1191, 1954.

2) Mansy, H., Yang, P. M. and Williams, D. R., "Quantitative measurement of three-dimensional structure in the wake of a circular cylinder", *J. Fluid Mech.*, Vol. 270, 1994, pp. 277-296.

3) Williamson, C. H. K., "Three-dimensional wake transition," *J.Fluid Mech.*, Vol. 328, 1996, pp. 345-407.

4) Chyu, C. and Rockwell, D., "Envolution of patterns of streamwise vorticity in the turbulent near wake of a circular cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 320, 1996, pp. 117-137.

5) Wu, J., Sheridan, J., Welsh, M. C., Hourigan, K. and Thompson, M., "Longitudinal vortex structures in a cylinder wake," *Phys. Fluids*. Vol.6, 1994, pp. 2883-2885.

6) Lourenco, L., Subramanian, S. and Ding, Z., "Time series velocity field reconstruction from PIV data," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, 1997, pp. 1533-1538.

7) **김경천, 윤상열, 김상기**, “**와추적 위상평균 기법을 이용한 원주후류의** PIV **측정**.”**대한기계학회 유체공학부문** 1999**년도 추계학술대회 논문집**, 1999, pp. 55-60.

8) **성재용, 박강국, 유정열**, "Cinematic PIV**에 의한 실린더 후류의 위상평균된** 3**차원구조**", **대한기계학회** 2000**년도 춘계학술대회논문집**(B), 2000, pp. 661-666.

9) Chang, T. P., Wilcox, N. A., Tatterson, G. B., "Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields", Opt. Eng. Vol. 23(3), 1984, pp. 283-287

10) Chang, T. P., Tatterson, G. B., "An automated analysis method for complex three dimensional mean flow fields", Proc. Third Int. Symp. Flow Visualization, 1983, pp. 266-273

11) Yamakawa, M., Iwashige, K., "On-line velocity distribution measuring system applying image processing", J. Flow Visualization Soc. Jpn., Vol. 6(20) 1986, pp. 50-58.

12) Racca, RG., Dewey, JM., "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field", Exp. in Fluids, Vol. 6 .1988, pp. 25-32.

13) Adamczyk, A. A., Rimai, L., "Reconstruction of a three-dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images". Exp. in Fluids, Vol. 6, 1988, pp. 380-386

14) Kobayashi, T., Saga, T., Sekimoto, K., "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing", ASME FED Vol. 85, 1989, pp. 29-36

15) Kasagi, N., Hirata, M., Nishino, K., Ninomiya, N., Koizumi, N., "Three-dimensional velocity measurement via digital image processing technique", J flow Visualization Soc. Jpn., Vol. 7(26), 1987 , pp. 283-288.

16) Nishino, K. Kasagi, N., Hirata, M., "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", ASME J. Fluids Eng. Vol.111 No. 4, 1989, pp. 384-391.

17) Panantoniou, D., Dracos, T., "Analyzing 3-D turbulent motions in open channel flow by use of stereoscopy and particle tracking", Advances in Turbulence 2 (Ed. Fernholz HH; Fiedler HE). 1989, pp. 278-285. Berlin: Springer-Verlag.

18) Kent, JC., Trigui, N., Choi, WC., Guezennec, YG., Brodkey, RS., "Photogrammetric calibration for improved three-dimensional particle tracking velocimetry", Proc. SPIE Int. Symp. on Optical Diagnostic in Fluid and Thermal Flows, San Diego, July. 1993,

19) Kasagi, N., Nishino, K., "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry". Exp. Thermal and Fluid Sci. Vol. 4, 1991, pp. 601-612

20) Mass, H. G., Gruen, A., Papantoniou, D. A., "Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows". Part 1 photogrammetric determination of particle coordinates, Exp. In Fluids. Vol. 15 1993, pp. 133-146

21) Malik, N. A., Dracos, Th., Papantoniou, D. A., "Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows", Part 2. Particle tracking. Exp. In Fluids. Vol. 15, 1993, pp. 279-294

22) Doh, D. H., D. H. Kim, Choi, S. H., Hong, S. D., Kobayashi, T., Saga, T., "Single-frame 3D-PTV for high speed flows", Exp. in Fluid (to be published in 2000)

23) **도덕희**, "3**차원** PIV**를 이용한 유동장의** 3**차원 계측**", **대한기계학회** 99**년도 유체공학부문 춘계학술강연회 강연집**, **한양대학교 백남학술정보관**, 1999, 5, 14, pp. 41-49.

24) Ballard, D, H., Brown, C, M.,"computer vision". New Jersey: Prentice-Hall, 1982, pp. 195-225.

25) Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T., Tsuda, N., "Development of a real-time velocity measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design", In: Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.). ASME FED Vol. 128, 1991, pp. 9-14

26) Okamoto, K., "Three-dimensional particle tracking algorithm Velocity Vector Histogram and Spring Model", Proc. of 3rd PIV Workshop, Fukui, Japan. 1995.

27) Yamada, H., Yamane, K., "Particle image velocimetry using a genetic algorithm", **可視化情報**, Vol. 15 Suppl. No. 1, 1995, pp. 165-168.

28) Ohyama, R., Takagi, T., Tsukiji, T., Nakanishi, S., Kaneko, K., "Particle tracking technique and velocity measurement of visualized flow fields by means of genetic algorithms", **可視化情報**, Vol. 13 Suppl. No. 1, 1993, pp. 22-25.

29) Kimura, I., Hattori, A., and Ueda, M., "Particle pairing using genetic algorithms for PIV", Proceedings of VSJ-SPIE98 December 6-9, 1998, Yokohama, JAPAN AB093

30) **도덕희**, **조용범**, **홍성대**, "**유전적 알고리듬에 의한** PIV**계측법**", **대한기계학회 춘계학술대회 논문집**(B), **울산대학교**, 2000, pp. 650-654.

31) Murai, S., Nakamura, H., Suzuki, Y., "Analytical orientation for non-metric camera in the application ot terrestial photogrammetry", In Architecture Photogrammetry XXIII. Commision V. 1980, pp.516-524.

32) **北條**, **高島**, "PIV**における異常ベクトルの檢出**",**可視化情報**, Vol.15, Suppl. No.2, 1995, pp.177-180.

33) Masagi, N., "An introduction to measurement uncertainty analysis", J. Visualization. Visualization Society of Japan. Vol. 9(31), 1998, pp. 29-35

34) Agui, J. C., Jimenez, J., "On the performance of particle tracking", J. Fluid Mech. No1. 185, 1987, pp. 447-468.

35) Willert, C. E., and Gharib, M., "Digital particle image velocimetry", Exp. in Fluids, Vol.10, No. 4, 1991, pp.181-193.

36) Okamoto, K., "Evaluation of the 3D-PIV standard images(PIV-STD project Proc. The third international workshop on PIV'99-Santa Barbara (Ed. Adrian R. J.)". 1999, pp. 31-36

37) Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D., "On secondary vortices in the cylinder wake," *Phys. Fluids*, Vol. 8, 1996, pp. 2117-2124.

감사의 글

“향상 적극적이고 긍정적인 사고로 주어진 일에 최선을 다하고 도전하는 자세로 새로운 일을 개발하자.” 는 생활신조로 박사 학위과정을 시작한지 5년이란 세월이 흘러 마무리를 지으러 하니 만감이 교차합니다. 지금까지 지나간 과거를 되돌아 볼 시간도 없이 살았던 학위과정은 학문적 지식뿐만 아니라 사회에 대한 견문을 넓히는데 소중한 시간이었습니다. 학위과정동안 학문적으로 부족한 저에게 시종일관 관심과 배려를 아끼지 않으신 도덕희 지도교수님께 진심으로 감사드립니다.

그리고 바쁘신 중에도 저의 논문을 심사해 주시고 부족한 것을 일깨워 주신 남청도 교수님, 늘 웃음으로 반겨주시고 격려를 아끼시지 않은 김의간 교수님, 항상 변치 않는 관심을 가져주신 이영호 교수님께 감사를 드리며, 심사과정 중 격려와 관심을 가져주신 손경호 학장님께도 감사를 드립니다.

또, 제가 재직하고 있는 동안에 학위과정을 마칠 수 있도록 편의를 제공해주신 포항1대학의 하민영 학장님과 교직원에게 감사를 드리며, 특히 인화와 서로의 신뢰속에서 제자들에게 실천을 통해 사도를 펼치시고 계시는 자동차학과 임종문 교수님, 송창엽 학과장님과 동료 교수님들께 감사드립니다.

아울러 본 논문이 완성되기까지 오랜 기간 동고동락하며, 자신들의 일처럼 열의를 가지고 도와준 실험유체역학연구실의 조경래, 문지섭, 조용범, 이원제, 편용범, 황태규, 동경대학교에 유학중인 최성환 박사, 홍성대에게도 고마움을 전합니다. 그리고 일일이 열거하진 못하지만 보이지 않게 도움을 주었던 동기들, 선.후배님들 또한 저에겐 많은 도움이 되었습니다.

대학에서 가르치는 일과 학위과정 중에 부족한 시간 때문에 동문 및 동기회, 고향친구들의 결속체인 정우회 등의 여러 모임에서 참석률이 저조했지만 지속적인 격려와 성원을 보내준 동기들에 고마움을 전합니다.

항상 무조건적인 사랑으로 노심초사하시면서 자식들만 바라보시고 피와 땀을 흘리시면서 농사를 천직으로 생각하시고 자식들에게 성실성을 몸소 보여주셨던 부모님의 은혜는 잠시라도 잊은 적이 없습니다.

공부하는 형 때문에 항상 양보하면서 어려운 일만 뒤에서 처리하는 남동생, 여동생, 작은 일까지 관심을 가지시며 격려와 성원을 보내주신 장인, 장모님과 헤아릴 수 없는 친척, 친지 여러분께도 감사를 드립니다.

마지막으로 남편이 공부할 수 있도록 직장생활을 하면서 집안 일을 혼자서 보

이지 않게 처리하며 어려움을 감수한 아내와 일주일동안 피로에 지친 몸으로 집에 들어갔을 때 사랑으로 아빠의 피로를 풀어주었던 재민, 민석에게 앞으로 남편과 아빠로서 역할을 충실히 할 것을 다짐합니다.

늘 부족함을 느끼고 그것을 채우기 위해 뛰어 다녀야 했던 지난날들은 부족함이 많았지만 최선을 다했다는 위안을 가지면서 졸업은 끝이 아니라 시작이라는 자세로 학위과정을 마감하고자 합니다. 앞으로는 지금까지 배운 지식과 경험을 사회와 국가를 위해 사용되도록 노력하고 제가 이루지 못한 학창시절의 소망을 제자들을 통해 실현이 가능하도록 하겠습니다.

2000년 12월

함박골에서 백 태 실